

**Bestimmung der natürlichen Strahlenexposition
von außen im Stadtgebiet Erlangen
mit CaF_2 -TL-Dosimetern**

von

Reinhard Kleber

aus

Thiersheim/Oberfranken



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Institut für Radiologie
der Universität Erlangen-Nürnberg
Direktor: Prof. Dr. med. Dr. phil. nat. H. Pauly

**Bestimmung der natürlichen Strahlenexposition
von außen im Stadtgebiet Erlangen
mit CaF_2 -TL-Dosimetern**

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt
von
Reinhard Kleber
aus
Thiersheim/Oberfranken

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg



Dekan: Prof. Dr. W. Kersten

Referent: Prof. Dr.Dr. H. Pauly

Tag der mündlichen Prüfung: 18.02.1980

Meinen Eltern



INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung und Problemstellung	1
2.	Methodik	5
2.1.	Physikalische Grundlagen der Thermolumineszenz-Dosimetrie	5
2.2.	Auswahl des Dosimetermaterials	5
2.3.	Konstruktion der Dosimeterkapseln	7
2.4.	Vorbehandlung und Auswertung	8
2.4.1.	Leerwert und Nulldosisanzeige	11
2.4.2.	Funktionskontrolle	12
2.5.	Prüfung einzelner Eigenschaften und Testung der TL-Dosimetereinheit	12
2.5.1.	Untersuchung der Homogenität der Nachweisempfindlichkeit	14
2.5.2.	Untersuchung der Energieabhängigkeit	16
2.5.3.	Untersuchung der Richtungsabhängigkeit	18
2.6.	Eichung des Dosimetersystems	21
2.7.	Messung der Ortsdosis im Freien und in Gebäuden	23
2.7.1.	Verpackung der Dosimeter	24
2.7.2.	Aushängen der Dosimeter an den Meßorten	24
2.8.	Berechnung der mittleren Ortsdosisleistung	25
2.9.	Fading-Verhalten	29
2.10.	Genauigkeit der Methode	31
3.	Meßergebnisse und Diskussion	33
3.1.	Ortsdosisleistung im Freien	33
3.1.1.	Geologische Verhältnisse und geologisch-radiologische Daten	35
3.1.2.	Ortsdosisleistung über freiem Gelände	35
3.1.2.1.	Eigene Meßergebnisse	35
3.1.2.2.	Vergleich mit früheren Meßwerten	38

3.1.3.	Ortsdosisleistung über bebautem Gelände	39
3.1.3.1.	Eigene Meßergebnisse	39
3.1.3.2.	Vergleich mit früheren Meßwerten	41
3.1.4.	Zusammenfassung der Meßergebnisse im Freien	43
3.2.	Ortsdosisleistung in Gebäuden	45
3.2.1.	Ortsdosisleistung in Wohnungen	45
3.2.1.1.	Eigene Meßergebnisse	45
3.2.1.2.	Vergleich mit früheren Meßwerten	48
3.2.2.	Ortsdosisleistung in öffentlichen Gebäuden, Betriebs- und Geschäftsgebäuden	50
3.2.2.1.	Eigene Meßergebnisse	50
3.2.2.2.	Vergleich mit früheren Meßwerten	51
3.2.3.	Berechnung der mittleren Ortsdosisleistung in Gebäuden	52
3.3.	Die terrestrische Strahlenexposition im Stadtgebiet Erlangen	55
3.3.1.	Berechnungsmethode	55
3.3.2.	Mittlere jährliche terrestrische Strahlen- exposition im Stadtgebiet Erlangen	57
3.3.3.	Vergleich mit Literaturwerten	60
3.4.	Mittlere natürliche Strahlenexposition im Stadtgebiet Erlangen	62
4.	Fehlerbetrachtung	64
5.	Schluß	67
	Literatur	70
	Lebenslauf	

1. Einleitung und Problemstellung

Menschen haben insbesondere vor solchen Gefahren Angst, die nicht mit den Sinnen wahrgenommen werden können und deren Wirkung und Folgen nicht sogleich erkannt werden. In der heutigen Zeit spielt in diesem Zusammenhang die Gefährdung durch energiereiche Strahlung eine bedeutende Rolle. Für die Beurteilung des Strahlenrisikos durch zivilisatorische Einflüsse, wobei vor allem diagnostische Maßnahmen der modernen Medizin zu nennen sind, stellt die Kenntnis der natürlichen Strahlenexposition des Menschen als Bezugspunkt eine unabdingbare Voraussetzung dar.

Die natürliche Strahlenexposition ist die Summe von verschiedenen, auf alle Menschen einwirkenden Komponenten:

Die Intensität der kosmischen Strahlung hängt im wesentlichen ab von der Geographischen Breite und der Höhe über dem Meeresspiegel. Ihr Beitrag zur natürlichen Strahlenexposition beläuft sich in unseren Breiten in Meereshöhe auf etwa 28 mrem/a und steigt mit zunehmender Höhe an [3, 7].

Täglich gelangen bei der Nahrungsaufnahme und durch Inhalation natürliche Radionuklide in den Organismus, die aufgrund ihres unterschiedlichen chemischen Verhaltens zu verschiedenen hohen Organbelastungen, der natürlichen Strahlenexposition von innen, führen. Während Kalium-40 fast gleichmäßig im Körper verteilt wird, lagern sich Schwermetalle, wie Radium und Polonium, bevorzugt im Knochengerüst ab. Das respiratorisch aufgenommene Radium-Zerfallsprodukt Radon führt zu einer spezifischen Belastung der Bronchial- und

Alveolarepithelien. Im Mittel beträgt die anzurechnende Äquivalentdosis für Gonaden und Knochenmark in der Bundesrepublik etwa 30 mrem/a [3, 7].

Die terrestrische Komponente der natürlichen Strahlung ist bedingt durch die Gammastrahlung des ^{40}K und der Folgeprodukte des Urans und des Thoriums. Diese natürlichen Radionuklide sind, abhängig von den geologischen Verhältnissen und Böden, in örtlich verschiedenen Konzentrationen vorhanden. Durch zivilisatorische Maßnahmen, wie durch den Bergbau, die Errichtung fester Häuser und die Befestigung der Straßen, erfolgte eine gewisse Umverteilung dieser natürlichen Strahlungsquellen. Bei Berücksichtigung der entsprechenden Aufenthaltswahrscheinlichkeiten im Freien und in Gebäuden wird für die Bundesrepublik ein Mittelwert von etwa 50 mrem/a angegeben [3, 7].

Innerhalb der letzten Jahre wurde in verschiedenen Arbeiten die natürliche Strahlenexposition der Bevölkerung in einigen Ländern nach Größe, Art und Entstehung bestimmt sowie die örtlich und zeitlich bedingten Schwankungsbreiten und Häufigkeitsverteilungen untersucht [3, 4, 12, 13]. Vor allem die Strahlenexposition im Freien wurde dabei in großflächigem Maßstab bestimmt. Obwohl deshalb die örtlichen Werte der natürlichen Strahlenbelastung mehr oder weniger stark von den großräumig gemittelten Werten abweichen, können die dadurch entstehenden Fehler wahrscheinlich vernachlässigt werden.

Die Kenntnis der lokalen natürlichen Strahlenexposition ist jedoch aus zwei Gründen von Interesse: zum einen stellen die lokalen Ortsdosisleistungswerte der natürlichen Strahlung im Freien den

Bezugspegel für die Messung zusätzlicher Strahlenbelastungen durch radioaktive Kleinquellen in der Umwelt dar, zum anderen können genauere Aussagen über die Schwankungsbreite und Häufigkeitsverteilung der natürlichen Strahlenexposition bestimmter, relativ homogener Bevölkerungsteile ermöglicht und so erst ein Vergleich mit Mittelwert und Schwankungsbreite für die Gesamtbevölkerung eines Landes angestellt werden.

Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die Gebiete größerer Städte. Die Stadtbevölkerung stellt einen hohen Anteil an der Gesamtbevölkerung. In Stadtgebieten finden sich auf Grund des unterschiedlichen Radionuklidgehalts der verschiedenen Baustoffe und der Straßenbaumaterialien verbunden mit einer gewissen Abschirmwirkung oft stark abweichende Werte für die natürliche Strahlenexposition. Es liegen auch bereits mehrere Arbeiten über die natürliche Strahlenbelastung von Stadtbevölkerungen in verschiedenen Ländern vor [1, 9, 11, 15, 21, 29]. Für das Stadtgebiet Erlangen wurde eine erste Untersuchung von PFISTER, PHILIPP und PAULY durchgeführt [19]. In einem engmaschigen Netz von Meßpunkten wurde mit Hilfe von Szintillationsmeßgeräten die Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung bestimmt. Dadurch wurden zwar die räumlichen, nicht aber die zeitlichen Schwankungen der terrestrischen Strahlenexposition berücksichtigt.

In der vorliegenden Arbeit wurden mit $\text{CaF}_2\text{:Dy}$ -TL-Dosimetern im Stadtgebiet Erlangen über einen Zeitraum von etwa drei Monaten Ortsdosen bestimmt. Somit wurden tageszeitliche und meteorologisch bedingte Schwankungen der terrestrischen Strahlung erfaßt. TL-Dosimeter ermöglichen im Gegensatz zu den Szin-

tillationsdetektoren die unmittelbare Ermittlung der gesamten natürlichen Strahlenexposition von außen, da sie die kosmische Komponente mit fast der gleichen Empfindlichkeit nachweisen wie die terrestrische Gammastrahlung. Da aber die Ortsdosisleistung durch die kosmische Strahlung über einem kleinen regionalen Bereich als konstant vorausgesetzt und durch Messungen und Berechnungen in der Literatur ermittelt werden kann, können die eigenen Ergebnisse für die terrestrische Strahlenexposition mit denen aus [19] und anderen verglichen werden.

2. Methodik

2.1. Physikalische Grundlagen der Thermolumineszenz-Dosimetrie

In der Festkörperdosimetrie werden eine Anzahl von Stoffen verwendet, die ihre physikalischen Eigenschaften unter dem Einfluß von energiereicher Bestrahlung ändern. Das Prinzip der Radio-Thermolumineszenz-Dosimetrie (RTL-Dosimetrie) beruht darauf, daß die in bestimmten Kristallen (hier CaF_2) durch ionisierende Strahlen freigesetzten Elektronen vom Valenzband auf Zwischenstufen, sogenannte "Traps", angehoben werden, in denen sie eine temperaturabhängige Verweilzeit haben. Für höhere Energieniveaus kann die Verweilzeit bei Zimmertemperatur viele Jahre betragen. Bei Zufuhr von thermischer Energie ("Ausheizen") können diese Ladungsträger aus den "Traps" in das Leitfähigkeitsband angehoben werden. Beim nun folgenden Übergang der Elektronen vom Leitfähigkeitsband auf das Valenzband, den Grundzustand, wird die überschüssige Energie in Form eines Lichtquants emittiert. Das während der Ausheizphase im Auswertegerät emittierte Licht wird durch einen Photomultiplier verstärkt, in einen Stromfluß umgesetzt und integriert. Die insgesamt emittierte Strahlungsenergie ("Lichtsumme") ist dabei proportional der Anzahl der aus den "Traps" freigesetzten Elektronen, und diese wiederum proportional der absorbierten Energie und damit der Energiedosis im Kristall [10].

2.2. Auswahl des Dosimetermaterials

In der RTL-Personendosimetrie wurden bislang vor allem LiF-Dosimetersysteme verwendet [22, 23], da

LiF mit 8.14 eine ähnliche effektive Ordnungszahl wie menschliches Weichteilgewebe mit 7.42 besitzt. Deshalb verhält sich der Sondenfaktor eines LiF-RTL-Dosimeters auch bei niederen Photonenenergien fast energieunabhängig. Mit diesem Dosimeter wird also die im Weichteilgewebe absorbierte Dosis gemessen. Der Nachteil der LiF-Dosimeter, die einen Dosismessbereich von 10^{-3} bis 10^4 rd besitzen [10], liegt in ihrer zu geringen Empfindlichkeit. Da bei den Ortsdosismessungen in Wohnungen und im Freien über drei Monate ein Meßwert von etwa 20 mrd zu erwarten ist und dieses Ergebnis der unteren Nachweisgrenze der LiF-Dosimeter sehr nahekommt, sollten empfindlichere TL-Dosimeter verwendet werden.

Dieser Nachteil kann nun entweder durch eine Vergrößerung der Masse des Dosimeters oder durch Verwendung eines Dosimetermaterials von höherer Dichte und Ordnungszahl ausgeglichen werden.

Da bei großvolumigen, nicht kugelsymmetrischen TL-Dosimetern wegen der Schwächung im Dosimetermaterial eine starke Richtungsabhängigkeit der Anzeige besteht und die Größe des Dosimeters aus Gründen der Handlichkeit begrenzt ist, wurde mit CaF_2 ein Dosimetermaterial von wesentlich höherer Nachweisempfindlichkeit ausgewählt.

Es wurden "CaF₂:Dy/TLD-200-Ribbons" von der Firma Harshaw Chemical Co., Cleveland, Ohio, verwendet. Bei diesen CaF₂-Dosimetern handelt es sich um mechanisch robuste, optisch transparente, unter hohem Druck gesinterte Preßlinge. Ihre Abmessungen betragen 6.35 X 6.35 X 0.889 mm (Masse: 110 mg). Die CaF₂-Dosimeter haben eine um etwa 200-mal höhere Empfind-

lichkeit als die LiF-Dosimeter "TLD-100" (bei einer Photonenenergie von 1250 keV), weisen jedoch als Nachteil eine höhere Ordnungszahl und Dichte gegenüber Luft und Weichteilgewebe auf. Da die effektive Ordnungszahl eines Stoffes unterhalb von Energien von 100 keV (Überwiegen des Photoeffekts) in dritter Potenz in den Photoabsorptionskoeffizienten eingeht, bedingt dies eine starke Abnahme des Sondenfaktors und somit eine Zunahme der auf die Gleichgewichtsionendosis bezogenen relativen Anzeige. Bei niedrigen Photonenenergien ist die Anzeige der CaF_2 -Dosimeter folglich stark energieabhängig.

2.3. Konstruktion der Dosimeterkapseln

Die CaF_2 -Preßlinge sind äußerst empfindlich gegenüber Verschmutzung, Feuchtigkeit, mechanischen Einflüssen und auch Tageslicht. Der zuletzt genannte Punkt bewirkt bei vorbestrahlten TL-Dosimetern innerhalb kurzer Zeit ein hohes Anfangsfading (Abnahme der Anzeige) [26]. Als Material für die Dosimeterkapseln wurde schwarzes Plexiglas gewählt. Jede Kapsel besteht aus Bodenteil und Deckel und hat in geschlossenem Zustand die Form eines flachen Zylinders. Im Bodenteil befindet sich eine runde, den Abmessungen des CaF_2 -Preßlings angepaßte Ausbohrung. Beide Kapselteile werden durch ein selbstklebendes Tesaband zusammengehalten.

Der Aufbau und die genauen Abmessungen der Dosimeterkapsel sind in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt.

Kapsel und CaF_2 :Dy-TL-Preßling bilden zusammen die gebrauchsfertige Dosimereinheit.

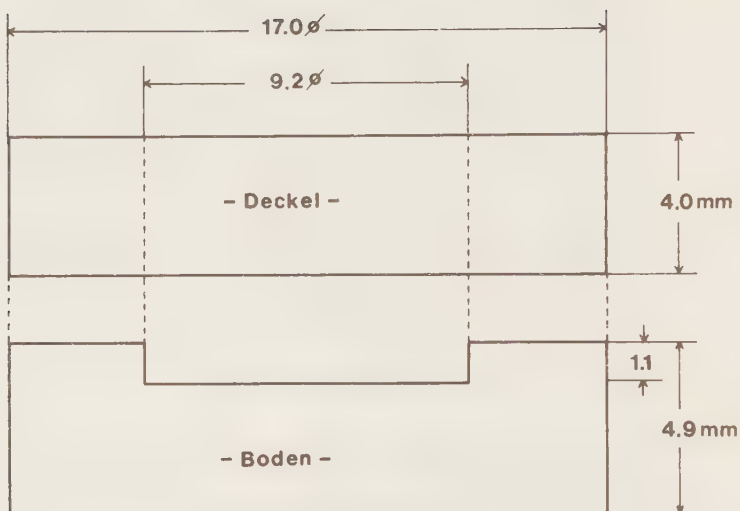


Abbildung 1: Aufriß mit den genauen Abmessungen der schwarz eingefärbten Plexiglas-Dosimeterschutzkapseln (Maßangaben in mm).

2.4. Vorbehandlung und Auswertung

Bei der Verwendung der TL-Dosimeter unterscheidet man verschiedene Arbeitsgänge.

Die CaF_2 -Preßlinge müssen vor einem erneuten Gebrauch zunächst dem Vorgang der Regenerierung ("Pre-Irradiation Annealing ") unterzogen werden. Hierdurch wird die durch den Ausheizvorgang nicht vollständig

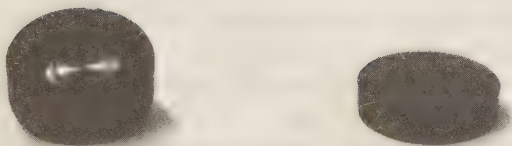


Abbildung 2: Dosimeterschutzkapsel mit LiF_2 -Dosimeter
in geöffnetem Zustand.

abgerufene Meßwertinformation gelöscht und die ursprüngliche Empfindlichkeit wieder hergestellt. Während dieser Wärmebehandlung, für die der "Glühofen Modell 622" der Firma P. A. Pitman Ltd, Mill Works, Jessamy Road, Weybridge, Surrey, benützt wurde, werden die TL-Dosimeter 1 1/2 Stunden lang bei 400°C ausgeheizt, innerhalb von 2 Stunden abgekühlt und schließlich 16 Stunden bei 80°C gelagert. (Mehr über die verschiedenen Regenerierungsmethoden findet sich bei KRÄMER [14].)

Die auf diese Weise regenerierten CaF_2 -Preßlinge wurden in die weiter oben beschriebenen Schutzkapseln verpackt und die nun gebrauchsfertigen Dosimetereinheiten zur Kalibrierung an einem der in Abschnitt 2.5. genannten Geräte bzw. zur Messung der Ortsdosis an einer der in Abschnitt 3. genannten Meßstellen frei Luft bestrahlt.

Die nun folgende Temperung ("Post-Irradiation Annealing") eliminiert durch Löschen des ersten, instabilen Maximums der Glowkurve den Einfluß des relativ großen Anfangsfadings. Dazu wurden die bestrahlten CaF_2 -Preßlinge aus den Schutzkapseln genommen und in nummerierte Ausbohrungen einer Messingplatte gelegt. Diese wurde mit einem Deckel verschlossen und in einem wasserdichten Messingtopf 15 Minuten lang in Wasser ausgekocht. (Näheres über die Temperung und deren Zweck siehe [5, 14, 22, 23, 26].)

Für den letzten Arbeitsgang, die Auswertung, wurde der "TL-Analyser Modell 2000 A + B" der Firma Harshaw Chemical Co., Cleveland, Ohio, verwendet. Dieses Gerät ist in der Arbeit von SCHREGLMANN [22] genau beschrieben. Jeweils ein CaF_2 -Preßling wurde bei geöffnetem Schieber in die Vertiefung des Heizschälchens gelegt, der Schieber geschlossen, die Meßkammer 30 Sekunden mit einem konstanten Stickstoff-Fluß von 0.1 l/Min. begast und schließlich das TL-Dosimeter während einer Zeitspanne von 30 Sekunden auf eine maximale Temperatur von 300°C erhitzt. Während dieses Ausheizvorgangs kommt es, wie bereits in Abschnitt 2.1. beschrieben, zu Elektronensprüngen innerhalb des CaF_2 -Preßlings und zur Freisetzung der überschüssigen Energie in Form von Lichtquanten. Die so emittierten TL-Signale werden im Auswertegerät von einem Photomultiplier verstärkt, in einen Stromfluß umgewandelt und der über die Meßdauer integrierte Photomultiplierstrom digital in Ladungs-

einheiten (nC bzw. μC) angezeigt. Nach Abkühlung des Dosimeterplättchens auf unter 100°C wurde dieser Ausheizvorgang jeweils wiederholt. Dieser Arbeitsgang soll zeigen, ob die gesamte Meßinformation bereits durch das erste Ausheizen aus dem Dosimeter abgerufen wurde. Der ständig konstante Stickstoff-Fluß von 0.1 l/Min. soll eine Verfälschung des Anzeigewertes vermeiden, da es durch sauerstoffbedingte Oberflächeneffekte ("Tribolumineszenz") sowie durch Verbrennung eventuell vorhandener Oberflächenverunreinigungen während des Ausheizvorgangs zu störenden Lichterscheinungen kommen kann [10, 22].

2.4.1. Leerwert und Nulldosisanzeige

Vor jeder Meßreihe bzw. nach jeweils zehn Ausheizvorgängen wurde die Leeraanzeige des Gerätes überprüft, indem die geschlossene Meßkammer ohne TL-Dosimeter während der üblichen Begasung mit Stickstoff in gleicher Weise wie oben beschrieben aufgeheizt wurde. Einzelheiten über die Zusammensetzung der Leeraanzeige ("Nulleffekt") können in [10] sowie in der Arbeit von SCHREGLMANN [22] nachgelesen werden. Dieser Leerwert wurde jeweils von der Bruttoanzeige des TL-Dosimeters abgezogen und sämtliche Berechnungen mit der so gefundenen Nettoanzeige durchgeführt.

Außerdem wurde die sogenannte Nulldosisanzeige bestimmt. Dazu wurden die Plättchen sofort nach der Regenerierung (also ohne nachfolgende Bestrahlung) dem Vorgang der Temperung unterzogen und ausgewertet. Diese Nulldosisanzeige ist in allen Meßergebnissen enthalten und wurde bei den Berechnungen entsprechend den Eichgeraden (siehe Abschnitt 2.6.) berücksichtigt.

2.4.2. Funktionskontrolle

"Die Funktion des Anzeigesystems muß durch Messen der Anzeige ohne Dosimeter (Leeranzeige) und mit einer konstanten Referenzlichtquelle (Referenzanzeige) vor und nach jeder Meßreihe überprüft werden. Die Referenzlichtquelle besteht im allgemeinen aus einem fluoreszenzfähigen Kristall, der durch eine radioaktive Substanz mit großer Halbwertszeit angeregt wird" [10]. Bei dem verwendeten "TL-Analyser Modell 2000 A + B" besteht diese Referenzlichtquelle aus einem radiumdotierten NaJ (Tl)-Kristall. Bei der Funktionskontrolle wird der Auswertevorgang bei geöffnetem Schieber wie beim normalen Ausheizen durchgeführt. Nach Beendigung der Auszählung muß in der Digitalanzeige ein Wert zwischen 28 und 32 nC stehen.

2.5. Prüfung einzelner Eigenschaften und Testung der TL-Dosimetereinheit

Für die Untersuchung der nachfolgend beschriebenen Eigenschaften des Dosimetersystems wurden die 50 kV Röntgenröhre Dermopan der Firma Siemens, die 200 kV Röntgenröhre Stabilipan der Firma Siemens, die 300 kV Röntgenröhre Stabilipan der Firma Siemens, die Cobalt-60 Fernbestrahlungsapparatur Gammatron I der Firma Siemens (1.17 und 1.33 MeV) (alle im Institut für Radiologie bzw. in der Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie) sowie die 1 Ci- und die 10 Ci-¹³⁷Cs-Strahlenquellen des amtlichen Eichmeßstandes bei der Firma Frieseke & Hoepfner GmbH, Erlangen-Bruck, (662 keV) verwendet.

In Tabelle 1 sind die verwendeten Geräte, die ange-

Gerät	Röhrenspannung	Filter	s_1 in mm Cu	E_{eff} in keV
Dermopan	10 kV	--	0.0011	--
Dermopan	30 kV	--	0.0057	12.1
Dermopan	50 kV	--	0.0280	21.4
Stabilipan	50 kV	2 mm Al	0.0490	26.2
Stabilipan	70 kV	2 mm Al	0.066	29.2
Stabilipan	120 kV	2 mm Al	0.13	37.3
Stabilipan	200 kV	0.5 mm Cu	1.18	84.7
Stabilipan	200 kV	2.0 mm Cu	2.05	110.0
Stabilipan	300 kV	Thoräus I	3.09	138.0
Stabilipan	300 kV	Thoräus III	4.22	172.0
^{137}Cs	--	--	10.7	662.0
^{60}Co (Gammatron)	--	--	22.0	1250.0

Tabelle 1: Effektive Photonenenergien der verwendeten Strahlenqualitäten.

legten Röhrenspannungen, die Filterung, die Halbwertschichtdicken s_1 in Cu und die effektiven Photonenenergien zusammengestellt.

Falls nichts anderes ausdrücklich erwähnt wird, lag die Einstrahlrichtung stets parallel zur Achse der zylindrischen Dosimeterkapseln (Einstrahlwinkel 0°).

2.5.1. Untersuchung der Homogenität der Nachweisempfindlichkeit

Die relative Empfindlichkeit von TL-Dosimetern muß ebenso wie die von anderen nicht absolut messenden Dosimetern, wie z.B. Filmdosimetern oder Ionisationskammern, in einem bekannten Strahlungsfeld ermittelt werden. Zur Arbeitserleichterung werden dann CaF_2 -Preßlinge mit ähnlicher Empfindlichkeit zu einer Gruppe zusammengefaßt und bei geringem Verzicht auf Genauigkeit als gleichempfindlich betrachtet. Deshalb wurden die 100 Plättchen der ersten Lieferungs-Charge und die 300 Plättchen der zweiten Lieferungs-Charge, abgepackt in den Kapseln, bei maximaler Feldgröße und einem Abstand von 80 cm 12 Sekunden lang am Gamma-tron (^{60}Co) frei Luft bestrahlt ($J = 11.05$ bzw. 10.85 R) und ausgewertet.

Dabei zeigte sich für die 100 Meßplättchen der ersten Charge eine relativ geringe Streuung der Empfindlichkeit von $\pm 7.91 \%$ (Standardabweichung). Diese CaF_2 -Preßlinge wurden zur "Gruppe I" zusammengefaßt.

Die zweite Charge zeigte, wie auch das Histogramm verdeutlicht, insgesamt eine höhere Empfindlichkeit bei einer klaren Aufspaltung in zwei Empfindlichkeitsgruppen. Diese beiden Empfindlichkeitsgruppen wurden

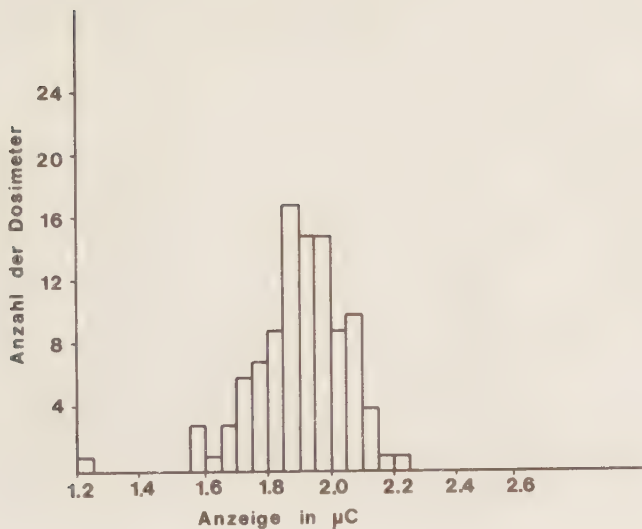


Abbildung 3: Verteilung der Nachweisempfindlichkeit der Dosimereinheiten, erste CaF_2 -("TLD-200")-Charge:

Abszisse: Anzeige der Dosimeter in μC nach Bestrahlung mit ^{60}Co -Gammastrahlung, 11.05 R, frei in Luft, Einstrahlwinkel 0° .

Ordinate: Anzahl der Dosimeter pro Anzeigeintervall.

als "Gruppe II" (Standardabweichung $\pm 6.58 \%$) und als "Gruppe III" (Standardabweichung $\pm 6.65 \%$) weiterverwendet.

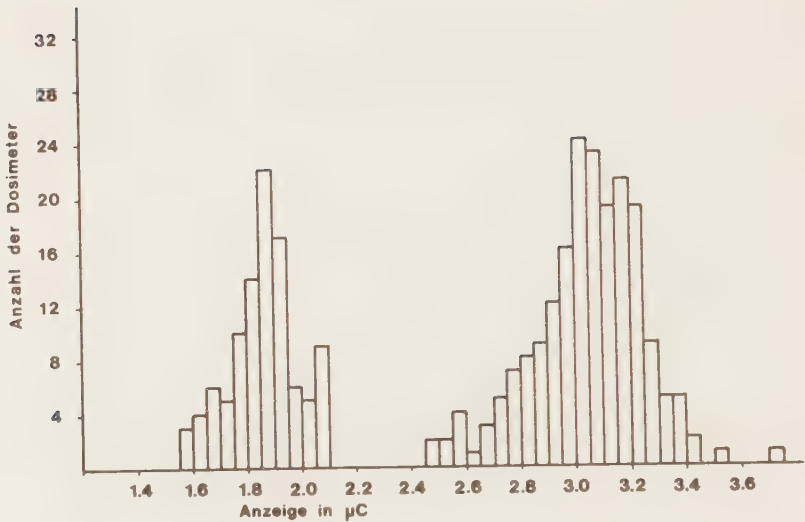


Abbildung 4: Verteilung der Nachweisempfindlichkeit der Dosimereinheiten, zweite CaF_2 -("TLD-200")-Charge:

Abszisse: Anzeige der Dosimeter in μC nach Bestrahlung mit ^{60}Co -Gammastrahlung, 10.85 R, frei in Luft, Einstrahlwinkel 0° .

Ordinate: Anzahl der Dosimeter pro Anzeigeintervall.

2.5.2. Untersuchung der Energieabhängigkeit

Von einem guten Dosimeter muß eine weitgehende Energieunabhängigkeit der relativen Anzeige gefordert werden.

Bei der Thermolumineszenzdosimetrie ist die relative Anzeige definiert als Quotient von Anzeige zu Gleichgewichtsdosis. Zur Überprüfung der Energieabhängigkeit wurden die Dosimeter bei bekannter Gleich-

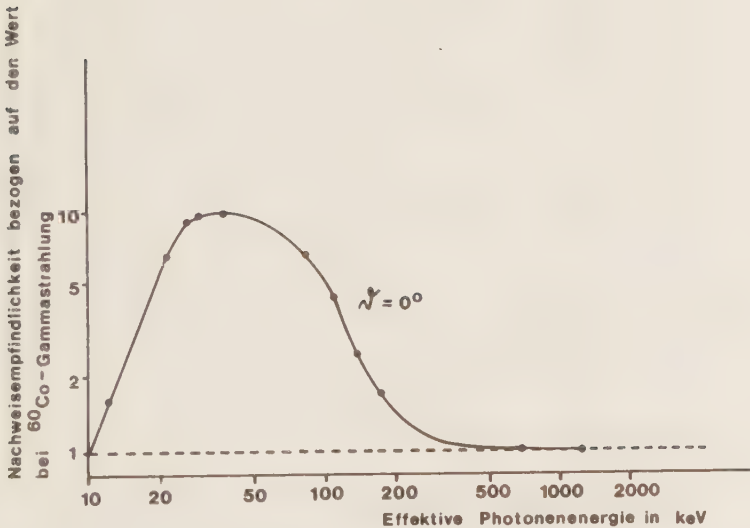


Abbildung 5: Energieabhängigkeit der Nachweisempfindlichkeit, gemittelt für die drei Dosimetergruppen, bei Einstrahlwinkel 0° .

Abszisse: Effektive Energie der Photonenstrahlung in keV.

Ordinate: Nachweisempfindlichkeit (Anzeige pro Gleichgewichtsdosis frei in Luft) bezogen auf den Wert bei ^{60}Co -Gammastrahlung.

gewichtsionendosis frei in Luft mit allen der in Tabelle 1 aufgeführten Strahlenqualitäten bei Einfallswinkel 0° bestrahlt und die relative Anzeige in nC pro mR bezogen auf den entsprechenden Wert bei ^{60}Co -Gammastrahlung (Gammatron) berechnet.

Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Anzeige von der Energie der auftreffenden Photonenstrahlung, wie bereits in Abschnitt 2.2. angedeutet wurde. Als Beispiel ist hier das Verhalten der TL-Dosimeter der "Gruppe I" dargestellt. Die relative Anzeige bezogen auf den Wert bei ^{60}Co -Gammastrahlung steigt bei Verwendung energieärmerer Strahlung immer mehr an. Unter den benützten Strahlenqualitäten findet sich bei einer effektiven Energie von 37.3 keV ein Maximum, das 10.5-mal höher ist als der Ausgangswert. Bei Verwendung noch niedrigerer Energien fällt die relative Anzeige wegen der Schwächung der Strahlung durch das Dosimeterkapselmateriale wieder steil ab.

2.5.3. Untersuchung der Richtungsabhängigkeit

Bei der Messung der Ortsdosisleistung durch die natürliche Gammastrahlung im Freien und in Gebäuden kann ein annähernd isotropes Strahlenfeld angenommen werden. Da die Meßsonden keinen kugelsymmetrischen Aufbau besitzen, wird die Anzeige von der Strahleneinfallrichtung, bezogen auf ein gewähltes Achsen-system durch den CaF_2 -Preßling, abhängen.

Zur speziellen Überprüfung der Richtungsabhängigkeit wurden die Dosimetereinheiten mit effektiven Photonenenergien von 29.2, 84.7, 110.0 und 1250.0 keV bei Einstrahlwinkeln von 0° , 30° ($=330^\circ$), 60° ($=300^\circ$), 90° ($=270^\circ$), 120° ($=240^\circ$), 150° ($=210^\circ$) und 180° be-

strahlt.

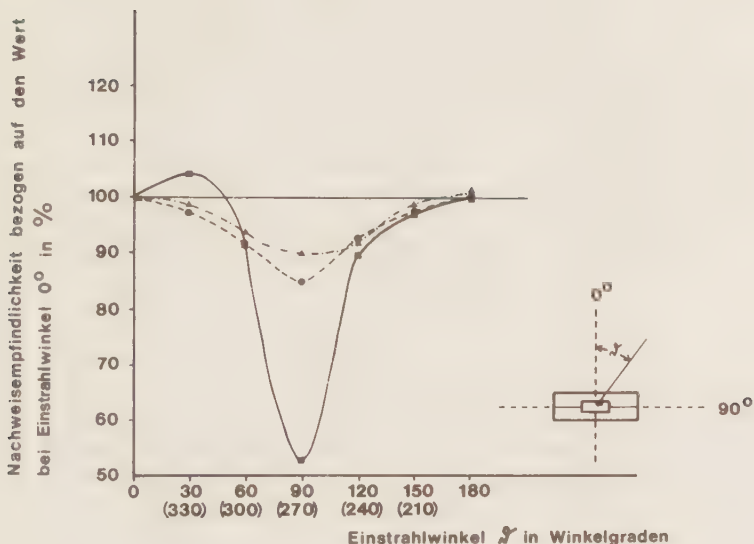


Abbildung 6: Richtungsabhängigkeit der Nachweisempfindlichkeit der für die Ortsdosismessungen verwendeten Dosimetereinheiten ("TLD-200" in Plexiglas-kapsel) bei verschiedenen Photonenenergien ("Gruppe I").

Abszisse: Einstrahlwinkel in Winkelgrad.

Ordinate: Nachweisempfindlichkeit (Anzeige pro Gleichgewichtsdosis frei in Luft) bezogen auf den Wert bei Einstrahlwinkel 0° , in %.

- — ■ $E_{eff} = 29.2 \text{ keV}$ (70 kV, ohne Filter)
- - - ● $E_{eff} = 110.0 \text{ keV}$ (200 kV, 2 mm Cu)
- ▲ - - ▲ $E_{eff} = 1250.0 \text{ keV}$ (^{60}Co)

Röhren- spannung	Filter	E_{eff} in keV	Relative Anzeige in $\frac{nC}{mR}$			Relative Anzeige bei 90° in Bezug auf 0° in %	
			bei 0° (=330°)	60° (=300°)	90° (=270°)		
70 kV	--	29.2	1.900	1.984	1.730	1.007	53.02
200 kV	0.5 mm Cu	84.7	1.264	--	--	1.065	84.26
200 kV	2.0 mm Cu	110.0	0.783	0.765	0.719	0.666	85.03
^{60}Co	--	1250.0	0.189	0.187	0.177	0.171	90.32

Tabelle 2: Abhängigkeit der relativen Anzeige der CaF_2 -Dosimeter bei Bestrahlung mit verschiedenen effektiven Photonenenergien und Einstrahlwinkeln von 0°, 30° (=330°), 60° (=300°) und 90° (=270°).

Dabei zeigte sich bei Einstrahlwinkeln von 0° bis 90° (analog: 180° bis 270°) eine Abnahme der relativen Anzeige bei einer deutlichen Abhängigkeit von der effektiven Photonenenergie. Die Anzeige bei einem Strahleneinfallswinkel von 180° entspricht der bei 0° . Bei Verwendung der effektiven Photonenenergie von 1250 keV (Gammatron) ergab sich bei einem Einfallswinkel von 90° ($=270^\circ$) eine Minderung der relativen Anzeige um etwa 10 % bezüglich der Anzeige bei 0° , bei einer effektiven Photonenenergie von 29.2 keV gar um fast 50 %. Zur Verdeutlichung dieser Verhältnisse sind in Tabelle 2 und in Abbildung 6 die Meßergebnisse der "Gruppe I", stellvertretend für alle drei Gruppen, angeführt.

2.6. Eichung des Dosimetersystems

Die Eichung des Dosimetersystems sollte nach Möglichkeit mit einer Dosis durchgeführt werden, die auch bei den Messungen im Freien und in den Gebäuden über drei Monate erwartet wird (etwa 20 bis 30 mR). Da eine solch kleine Dosis vom Gammatron nicht mit einer ausreichenden Genauigkeit erzeugt werden konnte, mußte auf eine Eichung mit der ^{60}Co -Strahlenquelle verzichtet werden. Vielmehr wurden für diese Kalibrierung die ^{137}Cs -Strahlenquellen von 1 Ci und 10 Ci des amtlichen Eichmeßstandes bei der Firma Friesseke & Hoepfner GmbH, Erlangen-Bruck, verwendet. Als Bezugswert diente die Gleichgewichtsdosis frei in Luft. Von den drei Empfindlichkeitsgruppen wurden, wie auch bei allen anderen Probemessungen, je zehn CaF_2 -Preßlinge bei Einstrahlwinkel 0° mit Dosen von 10, 20, 30, 40, 50, 75 und 100 mR bestrahlt, wobei die fünf ersten Dosen mit der 1 Ci-Strahlenquelle, die beiden letzten Dosen mit der 10 Ci-Strahlenquelle verabreicht wurden.

Die aus den Anzeigewerten in Abhängigkeit von der Gleichgewichtsdosis berechneten Ausgleichsgeraden zeigen für alle drei Dosimetergruppen die sehr gute Linearität der Anzeige. Aus Tabelle 3 sind die genauen Daten der drei Ausgleichsgeraden zu entnehmen. Der Achsenabschnitt A_0 enthält die Nulldosisanzeige, die durch die Einstellung des Kompensationsstroms zur Rauschunterdrückung am Auswertegerät beeinflusst wird.

Gruppe	ξ : Steigung der Ausgleichsgeraden in nC/mR	A_0 : Achsenabschnitt in nC
I	0.1874 ± 0.0020	$+ 0.2428 \pm 0.0534$
II	0.1869 ± 0.0014	$+ 0.2630 \pm 0.0436$
III	0.3053 ± 0.0034	$+ 0.7481 \pm 0.1088$

Tabelle 3: Steigung und Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden der Eichungsmessungen.

Wegen der Energie- und Richtungsabhängigkeit der relativen Dosimeteranzeige (siehe Abschnitte 2.5.2. und 2.5.3.) wird die Nachweisempfindlichkeit für das Spektrum der terrestrischen Gammastrahlung, $\bar{\xi}_t$, von dem bei der Kalibrierung mit ^{137}Cs -Gammastrahlung bei Einstrahlwinkel 0° ermittelten Wert (siehe Tabelle 3: Steigung ξ der Kalibriergeraden) abweichen. Bei Verwendung dieser Ausgleichsgeraden zur Bestimmung der terrestrischen Ortsdosisleistung aus der Dosimeteranzeige entsteht daher ein systematischer Fehler. Eine ausführliche Abschätzung ergab [20], daß bei den hier verwendeten CaF_2 -Dosimetern die Nachweisempfindlichkeit für die Energie- und Richtungsverteilung der terrestrischen Gammastrahlung um 32 % höher ist als für

^{137}Cs -Gammastrahlung bei Einstrahlwinkel 0° .

Dabei wurden die experimentell bestimmten ξ -Werte für die verschiedenen Photonenenergien und Einstrahlwinkel nach Energie- und Winkelintervallen gemittelt und durch jeweilige Gewichtung mit deren relativen Beiträgen zur terrestrischen Ortsdosisleistung in 1 m Höhe über dem Boden mit für Erlangen typischen natürlichen Radionuklidgehalt der integrale Mittelwert für das Spektrum der terrestrischen Gammastrahlung berechnet. In guter Näherung kann angenommen werden, daß diese Abschätzung auch für die Bestrahlungsgeometrie der terrestrischen Strahlung in Gebäuden gilt.

Ein zusätzlicher, wenn auch geringer Fehler bei Verwendung der Kalibriergeraden zur Auswertung ist dadurch gegeben, daß die Nachweisempfindlichkeit der Dosimeter für die kosmische Strahlung von der für ^{137}Cs -Strahlung abweicht. Nimmt man an, daß die Nachweisempfindlichkeit für die kosmische Strahlung gleich dem über alle Einstrahlwinkel gemittelten Wert bei ^{60}Co -Gammastrahlung ist, so kann der gesamte Einfluß der systematischen Abweichung der Kalibrierung auf die Werte für die terrestrische Ortsdosisleistung abgeschätzt werden (siehe Abschnitt 2.8.).

2.7. Messung der Ortsdosis im Freien und in Gebäuden

An jeder Meßstelle wurden drei Dosimeter ausgehängt. Zwei dieser Dosimeter waren stets unbestrahlt und entsprachen somit der Meßprobe. Bei der Auswertung wurde der Anzeigewert der Meßprobe durch Bestimmung des arithmetischen Mittels der beiden Einzelanzeigen berechnet. Das dritte Dosimeter war mit einer Dosis

von 4,84 R am Gammatron vorbestrahlt worden, um bei der Messung der Ortsdosis den Einfluß des Fadings zu erfassen (Fadingprobe). Um die anfängliche Anzeige zu erhalten, wurden vor dem Aushängen der Dosimeter für jede Gruppe zehn Plättchen ausgewertet, die zusammen mit den CaF_2 -Meßsonden der Fadingprobe bestrahlt worden waren (Kontrollprobe).

2.7.1. Verpackung der Dosimeter

Die " CaF_2 :Dy/TLD-200 Ribbons" wurden mit einer Pinzette in die Ausbohrung des Kapselbodenteils gelegt. Dann wurde die Dosimeterkapsel durch den Deckel verschlossen und zur Sicherung mit einem selbstklebenden Tesaband umwickelt. Je drei Dosimeter (zwei Meßproben und eine Fadingprobe) wurden nun in einen durchsichtigen, stabilen, wasserdichten PVC-Schlauch eingeschweißt, um die CaF_2 -Preßlinge verlässlich vor Feuchtigkeit zu schützen.

2.7.2. Aushängen der Dosimeter an den Meßorten

Diese Meßeinheiten wurden sowohl im Freien als auch in den Gebäuden möglichst in etwa 1 m Höhe angebracht. Im Freien hingen sie versteckt in Sträuchern und Bäumen, in den Gebäuden zumeist in der Mitte eines Raumes, mit einem Klebeband unter Tischen befestigt.

Die Meßdauer schwankte zwischen 85 und 144 Tagen. Da die Expositionszeit von der Beendigung des Regenerierens bis zum Aushängen am Meßort und vom Einsammeln bis zur Auswertung zusammen nur maximal 8 Stunden betrug, was einem Fehler $< 0.5 \%$ in der Expositionszeit entspricht, kann dies bei der Berechnung vernachlässigt werden.

2.8. Berechnung der mittleren Ortsdosisleistung

Bei gleicher Meßzeit erhalten sowohl Meß- als auch Fadingprobe die gleiche Ortsdosis. Da beide auch dem Einfluß des Fading-Effekts unterliegen, ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\text{Meßprobe: } A_P = \dot{A}_P \cdot \int_0^{t_x} f(t) dt, \quad (1)$$

$$\text{Fadingprobe: } A_F = A_K \cdot f(t_x) + \dot{A}_P \cdot \int_0^{t_x} f(t) dt, \quad (2)$$

mit: A_P : Anzeigewert der Meßprobe abzüglich Leerwert in nC.

$\dot{A}_P$: Mittlerer Zuwachs der Anzeige der Meßprobe pro Zeiteinheit ohne Fading, in nC/h.

A_F : Anzeigewert der Fadingprobe abzüglich Leerwert in nC.

A_K : Mittlerer Anzeigewert der Kontrollgruppe in nC zur Zeit $t_x = 0$.

Bei konstanter Temperatur T kann näherungsweise von der Annahme ausgegangen werden, daß das Fadingverhalten einer Exponentialfunktion folgt:

$$f(t) = e^{-\frac{t}{\tau}},$$

wobei τ die Fading-Zeitkonstante darstellt.

Nach Auflösen des Integrals

$$\int_0^{t_x} f(t) dt \quad \text{mit} \quad f(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{ergibt sich:}$$

$$\int_0^{t_x} \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \right) dt = \tau \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_x}{\tau}} \right) .$$

Nach Einsetzen dieser Beziehung in die Gleichungen (1) und (2) läßt sich die Fading-Zeitkonstante τ berechnen:

$$\tau = \frac{t_x}{\ln \left(\frac{A_K}{A_F - A_P} \right)} . \quad (3)$$

Durch Einsetzen und Umstellen erhält man aus Gleichung (1):

$$\dot{A}_P = \frac{A_P}{\tau \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_x}{\tau}} \right)} . \quad (4)$$

Entsprechend den Kalibriergeraden gilt:

$$\dot{A}_P = 10^{-3} \cdot \xi \cdot \dot{J} + \frac{A_0}{t_x} , \quad (5)$$

mit: $\dot{J}$: über die Expositionszeit gemittelte Ortsdosisleistung in $\mu R/h$.

ξ : Nachweisempfindlichkeit der Dosimeter in nC/mR (=Steigung der Kalibriergeraden).

A_0 : Nulldosisanzeige der Dosimeter in nC (=Achsenabschnitt der Kalibriergeraden).

t_x : Meßzeit (=Expositionszeit am Meßort) in h.

Durch Einsetzen von Gleichung (4) in Gleichung (5) ergibt sich schließlich:

$$\dot{J} = \frac{10^3 \cdot A_p}{\varepsilon \cdot \tau \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_x}{\tau}}\right)} - \frac{10^3 \cdot A_o}{\varepsilon \cdot t_x} - (\mu R/h) \quad (6)$$

Der nach Gleichung (6) berechnete Wert entspricht der mittleren Ortsdosisleistung der natürlichen Strahlung, da die Nachweiswahrscheinlichkeit der TL-Dosimeter für kosmische Strahlung annähernd gleich der für hochenergetische Gammastrahlung ist. Da die durch die kosmische Strahlung bedingte Ortsdosisleistung im Stadtgebiet Erlangen als im Mittel konstant angenommen werden kann, erleichtert sich die Berechnung der Werte der mittleren terrestrischen Ortsdosisleistung $\dot{J}_t$ aus den gefundenen Meßwerten:

$$\dot{J}_t = \dot{J} - \dot{J}_k, \quad (7)$$

mit: $\dot{J}_k$: Ortsdosisleistung durch die kosmische Strahlung in $\mu R/h$.

Für Erlangen ergeben sich dabei durch Interpolation und Mittelung der von O'BRIEN und McLAUGHLIN [18] angegebenen Werte folgende mittlere kosmische Ortsdosisleistungen $\dot{J}_k$:

$$\text{Im Freien: } \dot{J}_k = 3.8 \mu R/h,$$

$$\text{In Gebäuden: } \dot{J}_k = 3.0 \mu R/h.$$

Als mittlerer Abschirmfaktor der Gebäude für kosmische Strahlung wurde hierbei 0.8 [8] eingesetzt.

Der Einfluß der systematischen Abweichung der Kalibrierung auf die Bestimmung der terrestrischen Ortsdosisleistung (siehe Abschnitt 2.6.) kann durch folgende Beziehung abgeschätzt werden:

$$\frac{\dot{J}_t}{(\dot{J}_t)_{\text{korr}}} = \frac{\overline{\xi}_t}{\xi} \cdot \frac{(\dot{A}'_P - 10^{-3} \cdot \xi \cdot \dot{J}_k)}{(\dot{A}'_P - 10^{-3} \cdot \xi_k \cdot \dot{J}_k)} \quad (8)$$

mit: $\dot{J}_t$: Terrestrische Ortsdosisleistung, bestimmt unter Verwendung der Kalibriergeraden, in $\mu\text{R/h}$ (Gleichungen (6) und (7)).

$(\dot{J}_t)_{\text{korr}}$: Terrestrische Ortsdosisleistung, korrigiert für die systematische Abweichung der Nachweisempfindlichkeit der Kalibrierung, in $\mu\text{R/h}$.

$\overline{\xi}_t$: Integrale mittlere Nachweisempfindlichkeit für die terrestrische Gammastrahlung in nC/mR .

ξ_k : Nachweisempfindlichkeit für die kosmische Strahlung in nC/mR ; hier gleich Nachweisempfindlichkeit bei ^{60}Co -Gammastrahlung, gemittelt über alle Einstrahlwinkel.

$\dot{A}'_P$: Anzeigewert, korrigiert für Fading und Null-dosisanzeige, pro Zeiteinheit in nC/h ;

$$\left(= \dot{A}_P - \frac{A_0}{t_x} \right)$$

Für die in dieser Arbeit verwendeten CaF_2 -Dosimeter gilt (siehe Abschnitt 2.6.):

$$\frac{\overline{\xi}_t}{\xi} = 1.32 \quad .$$

2.9. Fading-Verhalten

Das Fading fällt um so stärker ins Gewicht, je höher die Temperatur während der Bestrahlung und Lagerung ist und je tiefer die Temperatur des Maximums einer Ausheizkurve liegt. Das große Anfangsfading, bedingt durch die mehr oder minder vollständige Löschung der "kurzlebigen Maxima", muß durch eine besondere Wärmebehandlung eliminiert werden [10]. Die Angaben für diese sogenannte "Temperung" werden vom Dosimeter-Hersteller mitgeliefert und wurden bereits in Abschnitt 2.4. beschrieben. Der Energieverlust in den höheren Maxima während der Meßzeit beträgt dann bei lichtgeschützten TL-Dosimetern nur noch wenige Prozent der Anzeige.

Da der Temperaturverlauf an den einzelnen Meßorten jeweils verschieden ist, muß bei der Auswertung die Anzeige der einzelnen Fadingprobe mit dem mittleren Anzeigewert der entsprechenden Kontrollgruppe verglichen werden. Bei den Messungen ergaben sich folgende Werte für die mittlere prozentuale Abnahme von A_F :

Gruppe I: Abnahme von A_F auf 96.8 % ($\overline{t_x} = 94$ d),
Gruppe II: Abnahme von A_F auf 94.8 % ($\overline{t_x} = 130$ d),
Gruppe III: Abnahme von A_F auf 95.0 % ($\overline{t_x} = 85$ d)
des mittleren Anzeigewertes A_K der jeweiligen Kontrollgruppe.

Bei der Auswertung eines Teils der Plättchen aus der Gruppe III ergab sich merkwürdigerweise eine Zunahme der mittleren prozentualen Anzeige von A_F auf 109.6 % ($t_x = 105$ d). Dieses sonderbare Verhalten kann auch durch die Anzeigeschwankungen innerhalb einer Plätt-

chengruppe nicht hinreichend erklärt werden. Bei der Berechnung der Ortsdosisleistung wurde hier der Einfluß des Fadings vernachlässigt. Ein Vergleich mit entsprechenden Ergebnissen (Häuser gleichen Baumaterials), bei denen das Fadingverhalten berücksichtigt wurde, zeigt, daß diese Vernachlässigung keine signifikanten Unterschiede ergibt.

Die Berechnungsformel der Fading-Zeitkonstanten τ vereinfacht sich, da $A_F \gg A_P$ ist, auf:

$$\tau = \frac{t_x}{\left(\ln \frac{A_K}{A_F} \right)}$$

Als mittlere Werte für die Fading-Zeitkonstante ergeben sich somit aus den Meßwerten der Kontrollproben und der Fadingproben:

$$\overline{\tau}_I = 2880 \text{ d}; \quad \overline{\tau}_{II} = 2790 \text{ d}; \quad \overline{\tau}_{III} = 1651 \text{ d}.$$

Durch Einsetzen der Fading-Zeitkonstanten τ in Gleichung (3) aus Abschnitt 2.8. und durch Umformung erhält man den mittleren Fading-Korrekturfaktor

$$\frac{\left(\ln \frac{A_K}{A_F} \right)}{\left(1 - \frac{A_F}{A_K} \right)},$$

woraus sich bei Einsetzen der Mittelwerte von A_K und A_F folgende Werte für die einzelnen Empfindlichkeitsgruppen ergeben:

Gruppe I: 1.014; Gruppe II: 1.028; Gruppe III: 1.026.

2.10. Genauigkeit der Methode

Die experimentelle Meßunsicherheit der Methode für die mittlere Ortsdosisleistung beträgt $\pm 9.0 \%$ (Gruppe I), $\pm 8.2 \%$ (Gruppe II) und $\pm 7.5 \%$ (Gruppe III) (Berechnung siehe Abschnitt 4.). Dieses Verhalten wird hauptsächlich durch die Streuung der Anzeigeempfindlichkeit innerhalb der drei Dosimetergruppen bestimmt, die zwischen $\pm 6.6 \%$ und $\pm 7.9 \%$ liegt (siehe Abschnitt 2.5.1.).

In den Ergebnissen werden einige systematische Fehlerquellen nicht berücksichtigt. Hierzu zählt vor allem die oben ausführlich beschriebene systematische Abweichung der Kalibrierung aufgrund der Energie- und Richtungsabhängigkeit der relativen Dosimeteranzeige. Die Höhe der dadurch gegebenen Überschätzung der terrestrischen Ortsdosisleistung und damit auch der mittleren terrestrischen Strahlenexposition wird in Abschnitt 3. bei der Diskussion der Ergebnisse im einzelnen abgeschätzt. Dabei finden sich Werte zwischen 20 und 30 % für Einzelmessungen und zwischen 26 und 29 % für die Mittelwerte.

Der Einfluß der "Selbstbestrahlung", bedingt durch radioaktive Verunreinigungen in TL-Dosimetermaterial und Dosimeterkapseln, kann als vernachlässigbar klein angenommen werden [16]. Auch der systematische Fehler, der durch Zeitverluste bei Verpackung, Transport und Auswertung der Dosimeter entsteht, kann als vernachlässigbar klein betrachtet werden.

Ebenso vernachlässigt werden kann der Beitrag der natürlichen Betastrahlung, da der weitaus größte Anteil der Elektronen des natürlichen Betastrahlen-

feldes in Luft in 1 m Höhe Energien bis zu 1 MeV [16] und damit Reichweiten von $\leq 0.4 \text{ g/cm}^2$ aufweist, die Massenbelegung der Dosimeterkapseln jedoch $\geq 0.47 \text{ g/cm}^2$ beträgt.

O'BRIEN gibt an, daß die Nachweiswahrscheinlichkeit von LiF-Dosimetern für kosmische Strahlung um etwa 14 % niedriger liegt als die für hochenergetische Gammastrahlung [17]. Dieser Unterschied muß aufgrund der Ergebnisse von ALMOND und McCRAY [2] für CaF_2 -Dosimeter eher geringer angesetzt werden. Der Einfluß dieses Effekts auf die Berechnung der terrestrischen Ortsdosisleistungswerte wurde vernachlässigt, jedoch bei den Ergebnissen für die mittlere terrestrische Strahlenexposition im Stadtgebiet Erlangen abgeschätzt (siehe Abschnitt 3.3.3.).

Die Nachweisgrenze der Methode ist definiert als die dreifache Standardabweichung der "Nulldosis", d.h. der Dosis, die der Nulldosisanzeige sofort nach Regenerierung abzüglich Leerwert entspricht. Die Werte der mittleren Nulldosisanzeige sind hier durch die Achsenabschnitte A_0 der Kalibriergeraden (siehe Tabelle 3) gegeben. Aus deren Standardabweichungen ergeben sich nach Berücksichtigung der mittleren Meßzeiten als Nachweisgrenzen für die mittlere Ortsdosisleistung 0.4 $\mu\text{R/h}$ (Gruppe I), 0.2 $\mu\text{R/h}$ (Gruppe II) und 0.5 $\mu\text{R/h}$ (Gruppe III).

3. Meßergebnisse und Diskussion

Die Meßeinheiten wurden an 26 verschiedenen Stellen im Freien und in 79 Wohnungen bzw. öffentlichen Gebäuden im Stadtgebiet Erlangen ausgehängt. Bei der Auswertung wurden die gefundenen Ergebnisse auf mittlere Ortsdosisleistung in $\mu\text{R/h}$ umgerechnet (siehe Abschnitt 2.8.). Durch Subtraktion der als konstant angenommenen mittleren Ortsdosisleistung durch die kosmische Strahlung von den Meßergebnissen erhält man die Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung. In der vorliegenden Arbeit beziehen sich die gefundenen Ergebnisse zumeist auf die Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung, da hierdurch ein Vergleich mit den Ergebnissen aus [19] erleichtert wird und der Einfluß der geologischen Verhältnisse und der Straßen- und Häuserbaumaterialien unmittelbar aufgezeigt werden kann.

3.1. Ortsdosisleistung im Freien

Im Freien wurde die Ortsdosis über freiem Gelände (10 Meßwerte) und über bebautem Gelände (16 Meßwerte) bestimmt. Um gute Vergleichsmöglichkeiten mit Ergebnissen aus [19] zu haben, waren viele der eigenen Meßorte identisch mit Meßstellen aus [19]. Eine genaue Übersicht über die Lage der einzelnen Meßorte und die dort erhaltenen Meßwerte für die mittlere Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung gibt Abbildung 7.



Abbildung 7: Mittlere Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung im Stadtgebiet Erlangen in pR/h [25].

3.1.1. Geologische Verhältnisse und geologisch-radiologische Daten

Eine ausführliche Darstellung der geologischen Verhältnisse und eine Zusammenfassung der geologisch-radiologischen Daten ist im Forschungsbericht des Instituts für Radiologie der Universität Erlangen-Nürnberg [19] nachzulesen. Auf eine eigene Beschreibung wird verzichtet. Falls es jedoch bei der Darstellung und Diskussion der gefundenen Ergebnisse wegen des besseren Verständnisses angebracht erscheint, auf die geologischen Grundlagen zurückzugreifen, so sind diese speziellen Gegebenheiten im Einzelnen aufgeführt.

3.1.2. Ortsdosisleistung über freiem Gelände

3.1.2.1. Eigene Meßergebnisse

Im freien Gelände beträgt der mit den CaF_2 -Dosimetern gemessene Gesamtmittelwert $9.2 \pm 1.4 \text{ } \mu\text{R/h}$, was einem Wert von $5.4 \pm 1.4 \text{ } \mu\text{R/h}$ für die terrestrische Strahlung entspricht.

Die drei höchsten Meßwerte (Werte für die terrestrische Strahlung in Klammern) fanden sich mit $11.1 \text{ } \mu\text{R/h}$ ($7.3 \text{ } \mu\text{R/h}$) in der Brucker Lache sowie mit jeweils $10.5 \text{ } \mu\text{R/h}$ ($6.7 \text{ } \mu\text{R/h}$) in der Mönau und im Burgberggarten am Platen-Haus. Die Meßstellen in den Waldgebieten Brucker Lache und Mönau liegen im südlichen bzw. im westlichen Teil der Stadt Erlangen, einem Gebiet, in dem sich die Sandstein- und Lettenformationen in größeren Flächen direkt unter dem Mutterboden finden und nur von dünnen Sanddeckschichten überlagert sind. Am Meßort im Burgberggarten wird

der geologische Untergrund von Burgsandstein gebildet. Umfangreiche Messungen des Bayerischen Geologischen Landesamtes in den Jahren 1956 bis 1962 haben unter anderem auch in diesem Teil des Erlanger Stadtgebietes linsenförmige Vorkommen von Urkonzentrierungen in sogenannten "Aktivarkosen" ergeben mit bis zu 50 mal höheren spezifischen Aktivitäten als im umgebenden Sandstein. Hierdurch kann beispielsweise auch der hohe Meßwert von 10.0 $\mu\text{R/h}$ (6.2 $\mu\text{R/h}$) im Forst beim Waldkrankenhaus im oberen Teil des Burgberges erklärt werden. Auf dem Gelände des Siemens-Sportzentrums mit 7.3 $\mu\text{R/h}$ (3.5 $\mu\text{R/h}$) und am Fußweg entlang des Europakanals in Höhe des Membacher Wegs mit 7.4 $\mu\text{R/h}$ (3.6 $\mu\text{R/h}$) wurden die niedrigsten Werte gemessen. Das Sedimentgestein wird hier von teilweise meterdicken Sandschichten bedeckt, die einen niedrigen Gehalt an natürlichen Radionukliden aufweisen [19].

Die übrigen Meßwerte für die terrestrische Ortsdosisleistung schwanken zwischen 4.7 und 6.2 $\mu\text{R/h}$. Dieser relativ enge Meßbereich erklärt sich dadurch, daß verständlicherweise insbesondere im Freien die Ortsdosisleistung eng an die örtlichen geologischen Gegebenheiten geknüpft ist und im Stadtgebiet Erlangen einheitliche geologische Verhältnisse angetroffen werden.

Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die eigenen Meßergebnisse sowie, falls möglich, über die zugeordneten Vergleichswerte aus [19].

Ortsbeschreibung	Eigene Meßergebnisse $\dot{j}$ in $\mu R/h$	$\dot{j}_t$ in $\mu R/h$	Ergebnisse nach [19], $\dot{j}_t$ in $\mu R/h$	$\frac{\dot{j}_t(TID)}{\dot{j}_t[19]}$
Brucker Lache	11.1	7.3	5.9	1.238
Siemens-Sportzentrum	7.3	3.5	---	---
Schloßgarten	10.0	6.2	4.9	1.266
Burgberggarten am Platen-Haus	10.5	6.7	---	---
Forst beim Wald- krankenhaus	10.0	6.2	3.5	1.770
Regnitz-Grund beim Campingplatz	8.5	4.7	4.6	1.021
Fußweg am Europakanal	7.4	3.6	2.5	1.441
Mönau	10.5	6.7	3.5	1.916
Großer Bischofsweiher/ Ufer	7.7	3.9	4.7	0.830
Großer Bischofsweiher/ Wald	9.2	5.4	5.4	1.000

Tabelle 4: Mittlere Ortsdosisleistung im freien Gelände in $\mu R/h$.

3.1.2.2. Vergleich mit früheren Meßwerten

In [19] wurde als Mittelwert der terrestrischen Ortsdosisleistung für freies Gelände $3.7 \pm 0.6 \mu\text{R/h}$ errechnet.

Die eigenen Meßwerte zeigen den gleichen Zusammenhang mit den örtlichen Gegebenheiten, sind jedoch durchschnittlich um 31 % höher. Der Hauptgrund für dieses Verhalten ist in der starken Energie- und Richtungsabhängigkeit der Anzeige der CaF_2 -Dosimeter zu suchen (siehe Abschnitte 2.5.2. und 2.5.3.). Eine Berechnung nach Gleichung (8), Seite 28, zeigt, daß dadurch die angegebenen terrestrischen Ortsdosisleistungswerte im Mittel um 28 % zu hoch sind. Berücksichtigt man dies, so ist die Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus [19] als gut zu bezeichnen.

Ein Teil der verbleibenden Differenz zwischen den Einzelmeßwerten ist sicherlich darauf zurückzuführen, daß die Ortsdosisleistung im Freien von vielen, teilweise witterungsbedingten Faktoren abhängt und somit kurzfristigen Schwankungen unterworfen ist. Die größte Bedeutung hat hierbei der wechselnde Wassergehalt der oberen Bodenschichten, da ein hoher Wassergehalt eine Erhöhung der effektiven Bodendichte und in direkter Folge eine Erniedrigung der Energieflußdichte der Gammastrahlung über dem Boden bedingt.

Hinzukommt, daß die verglichenen Meßorte in einigen Fällen nicht genau übereinstimmten, sondern lediglich im gleichen Kleinbereich lagen und die örtlichen Ergebnisse der Szintillationsdosimeter-Messungen zu meist kleinräumig gemittelte Werte darstellen.

Schließlich muß bei der Beurteilung der Differenz zwischen den Gesamtmittelwerten noch berücksichtigt werden, daß es sich bei den TLD-Werten um Ergebnisse von wenigen Einzelmessungen handelt, während mit den Szintillationsdetektoren weite Bereiche des Erlanger Stadtgebietes, teilweise durch örtliche Mittelung, erfaßt wurden.

3.1.3. Ortsdosisleistung über bebautem Gelände

3.1.3.1. Eigene Meßergebnisse

Der Mittelwert für bebautes Gelände, Wohngebiete und Innenstadt, beträgt für die gesamte natürliche Strahlung $10.2 \pm 1.4 \mu\text{R/h}$, für die terrestrische Strahlung $6.4 \pm 1.4 \mu\text{R/h}$. Eine Zusammenfassung aller 16 Meßwerte gibt Tabelle 5.

Die Ortsdosisleistung über bebautem Gelände wird durch zwei zum Teil einander entgegenwirkende Faktoren beeinflusst. Die in den Straßen- und Gebäudebaustoffen enthaltenen natürlichen Radionuklide bedingen eine zusätzliche Ortsdosisleistung, während die Straßenbeläge andererseits die Gammastrahlung des Bodens abschirmen. Offensichtlich überwiegt im Mittel der erstere Effekt, da die Ortsdosisleistung für bebautes Gelände im Mittel um $1.0 \mu\text{R/h}$ höher liegt als für freies Gelände. In [19] wurde eine Differenz von $0.6 \mu\text{R/h}$ gefunden.

Die Meßwerte der Ortsdosisleistung für bebautes Gelände lassen sich noch einmal in zwei Untergruppen aufgliedern, und zwar in Meßwerte für die Innenstadt bzw. für die Ortskerne von eingemeindeten Vororten (I) und in Meßwerte für die Außenbezirke, den Hauptwohn-

Ortsbeschreibung	Eigene Meßergebnisse $\dot{j}$ in $\mu\text{R}/\text{h}$	$\dot{j}_t$ in $\mu\text{R}/\text{h}$	Ergebnisse nach [19], $\dot{j}_t$ in $\mu\text{R}/\text{h}$	$\frac{\dot{j}_t(\text{TLD})}{\dot{j}_t [19]}$
Tennenlohe, Sebastianstraße (A)	7.9	4.1	2.9	1.414
Eltersdorf, Verwaltungsstelle (I)	11.8	8.0	4.3	1.859
Werner von Siemens Realschule (A)	11.8	8.0	3.8	2.105
Kreuzung: Äußere Brucker-Paul Gossen Straße (A)	10.3	6.5	3.4	1.912
Südgelände der Universität (A)	8.1	4.3	---	---
Theodor Heuß Anlage (A)	9.7	5.9	3.4	1.727
Ohm-Platz (I)	9.6	5.8	---	---
Am Röthelheim (I)	12.6	8.8	7.8	1.129
Rathausplatz (I)	8.5	4.7	7.6	0.618
Hugenottemplatz (I)	10.8	7.0	6.2	1.129
Theaterplatz (I)	10.0	6.2	3.1	2.000
Garten der Universitäts-Hautklinik (A)	11.0	7.2	---	---
Sieglitzhofer Straße (A)	10.1	6.3	3.8	1.862
Büchenbach, Frankenwaldallee (A)	11.1	7.3	4.3	1.698
Alterlangen, Schulzentrum (A)	9.0	5.2	---	---
Dechsendorf, Ortsmitte (I)	10.9	7.1	4.0	1.776

Tabelle 5: Ortsdosisleistung im bebauten Gelände in $\mu\text{R}/\text{h}$.

(A) = Außenbezirk, (I) = Innenstadt.

gebieten (A). Für die in Tabelle 5 mit (I) gekennzeichneten Meßorte ergibt sich ein Mittelwert für die Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung von $6.8 \pm 1.4 \mu\text{R/h}$, für die mit (A) gekennzeichneten Meßorte ein solcher von $6.1 \pm 1.4 \mu\text{R/h}$. Da die Ortsdosisleistung in dichtbebautem Gebiet stark von den verwendeten Straßen- und Häuserbaumaterialien abhängt, in der Erlanger Innenstadt und in den alten Ortskernen der eingemeindeten Vororte wie z.B. Eltersdorf und Dechsendorf noch viele alte Ziegel- und Sandsteinbauten mit höherem Radionuklidgehalt stehen, ist diese zusätzliche Ortsdosisleistung nicht verwunderlich. Die alten Straßenbeläge, teilweise sogar Granit-Kopfsteinpflaster, tragen ebenfalls ihren Teil dazu bei. In den Außenbezirken macht sich die aufgelockerte Bebauung mit den vielen Grünflächen und die Verwendung von neueren Baustoffen mit niedrigen Radionuklidgehalt für die Häuser und für die Straßenbeläge bemerkbar.

3.1.3.2. Vergleich mit früheren Meßwerten

Der in [19] angegebene Gesamtmittelwert der terrestrischen Ortsdosisleistung für bebautes Gelände beträgt $4.3 \pm 0.8 \mu\text{R/h}$. Der eigene Mittelwert liegt um 49 % höher. Bei den zum Vergleich herangezogenen Meßstellen zeigt sich aber erneut eine gute Übereinstimmung der Ortsabhängigkeit. Lediglich der Meßort "Rathausplatz" fällt aus der Reihe. Die Berücksichtigung der Energie- und Richtungsabhängigkeit der CaF_2 -Dosimeter nach Gleichung (8) ergibt hier eine Überschätzung der terrestrischen Ortsdosisleistung im Mittel um 29 %, während die eigenen Meßergebnisse im Mittel um 60 % höher sind als die Ergebnisse der Szintillationsdosimeter-Messungen. Diese Diskrepanz,

ebenso wie die sehr große Streubreite der Unterschiede der Ergebnisse nach den beiden Meßmethoden, könnte darauf zurückzuführen sein, daß die Meßorte nicht genau übereinstimmten und zudem die TL-Dosimeter-Einheiten meist in Sträuchern oder niedrigen Bäumen über kleineren Flächen freien Erdreichs angebracht waren, mit dem Szintillationsdosimeter jedoch über dem Straßenbelag gemessen wurde. Dadurch ergeben sich bei höherem Radionuklidgehalt des Erdreichs höhere TLD-Werte, bei höherem Radionuklidgehalt der Straßenbeläge höhere Szintillationsdosimeterwerte. Letzteres dürfte vor allem im Falle des Rathausplatzes, der teilweise mit Granitpflaster belegt ist, zutreffen.

Die tageszeitlichen, witterungsbedingten Schwankungen, deren Gründe bereits in Abschnitt 3.1.2.2. erläutert wurden, spielen ebenfalls eine Rolle.

Im bebauten Gelände stützen sich die eigenen Meßergebnisse auf die verhältnismäßig kleine Zahl von 16 Einzelmessungen. In [19] wurde das gesamte Erlanger Stadtgebiet erfaßt, wobei allein mit einem PKW schon 393 Straßen abgefahren wurden und die fortlaufend mit einem Schreiber aufgezeichneten Ergebnisse schließlich straßenweise örtlich gemittelt wurden. Bei einer genügend großen Anzahl der Meßwerte wie in [19] mitteln sich extreme, gegenläufige Faktoren heraus. Im Verlauf einer Straße kann nämlich einmal die abschirmende Wirkung einer Teerdecke überwiegen, ein anderes Mal die hohe Anzeige bei Granit-Kopfsteinpflaster.

Zusammenfassend läßt sich sagen: Die bereits in [19] gefundene Tatsache, daß sich in der Innenstadt und den alten Dorfkernen im Mittel eine höhere terrestrische Ortsdosisleistung findet als in den Außen-

bezirken und Wohngebieten, wird durch die eigenen Messungen bestätigt. Die Vergleichswerte für Innenstadt und Außenbezirke in [19] waren mit 5.4 bzw. 4.2 $\mu\text{R/h}$ noch aussagekräftiger.

3.1.4. Zusammenfassung der Meßergebnisse im Freien

Eine zusammenfassende Übersicht über die im Stadtgebiet Erlangen gemessenen Ortsdosisleistungsmittelwerte im Freien gibt Tabelle 6.

Die Unterschiede zwischen den eigenen und den früheren Meßergebnissen beruhen sicherlich zum Teil auf der in [19] viel größeren Anzahl der Meßorte, auf den Unterschieden in beiden Mittelungsmethoden und den tageszeitlichen, witterungsbedingten Schwankungen. Der wichtigste Grund jedoch liegt in der starken Abhängigkeit der Anzeige der TL-Dosimeter von der Energie und Richtung der auftreffenden Photonenstrahlung. Vor allem der letztgenannte Punkt ist dafür verantwortlich zu machen, daß die eigenen Meßergebnisse im Durchschnitt um etwa 42 % höher liegen als die früheren Ergebnisse. Die Grundtendenz war, von einigen wenigen begründbaren Ausnahmen einmal abgesehen, stets gleich. Außerdem konnte die in [19] gefundene Tatsache einer höheren Ortsdosisleistung in der Innenstadt gegenüber den Außenbezirken bestätigt werden. Der Mittelwert der terrestrischen Ortsdosisleistung in Höhe von 6.1 $\mu\text{R/h}$ in den Außenbezirken, für die die aufgelockerte Struktur mit Häusern, Straßen und eingestreuten Grünflächen charakteristisch ist, liegt in der Mitte zwischen den Meßwerten im freien Gelände mit 5.4 $\mu\text{R/h}$ und der Innenstadt mit 6.8 $\mu\text{R/h}$.

Bereich	Eigene Ergebnisse $\dot{j}$ in $\mu\text{R}/\text{h}$	$\dot{j}_t$ in $\mu\text{R}/\text{h}$	Maximale Streubreite von $\dot{j}_t$ in $\mu\text{R}/\text{h}$	G_{exp} in $\mu\text{R}/\text{h}$	Ergebnisse nach [19] $\dot{j}_t$ in $\mu\text{R}/\text{h}$	$\frac{\dot{j}_t (\text{TLD})}{\dot{j}_t [19]}$
Freies Gelände	9.2 ± 1.4	5.4 ± 1.4	$3.5 - 7.3$	± 0.8	3.7 ± 0.6	1.460
Bebautes Gelände	10.2 ± 1.4	6.4 ± 1.4	$4.1 - 8.8$	± 0.9	4.3 ± 0.8	1.488
davon: Innenstadt	10.6 ± 1.4	6.8 ± 1.4	$4.7 - 8.0$	± 1.0	5.4 ± 1.6	1.259
Außenbezirke	9.9 ± 1.4	6.1 ± 1.4	$4.1 - 8.0$	± 0.9	4.2 ± 0.8	1.451
Differenz zwischen bebautem und freiem Gelände	+ 1.0	+ 1.0	----	----	+ 0.6	----

Tabelle 6: Übersicht über die Ortsdosisleistungsmittelwerte im Freien in $\mu\text{R}/\text{h}$.
 G_{exp} : Experimentelle Meßunsicherheit.

3.2. Ortsdosisleistung in Gebäuden

Die Messung der Ortsdosis erfolgte in 68 Wohnungen und in 11 öffentlichen Gebäuden, Betriebs- und Geschäftsgebäuden, die über das gesamte Stadtgebiet verteilt waren. Bei den Gebäuden wurde das verwendete Baumaterial und das Baujahr berücksichtigt und die Abhängigkeit der Ergebnisse von verschiedenen Stockwerkslagen untersucht. Als mittlerer Abschirmfaktor für die kosmische Strahlung wurde der Faktor 0.8 eingesetzt ($\dot{J}_k = 3.0 \mu R/h$). Eine Übersicht über die einzelnen Meßorte und ihre Verteilung über das Erlanger Stadtgebiet gibt Abbildung 8.

3.2.1. Ortsdosisleistung in Wohnungen

3.2.1.1. Eigene Meßergebnisse

In Tabelle 7 sind die gefundenen Werte für die mittlere Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung in Erlanger Wohnungen, aufgeschlüsselt nach Häusertypen und Baumaterialien, zusammengestellt.

Diese Ergebnisse beweisen, daß die Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung in Wohnungen stark durch die verwendeten Baumaterialien beeinflusst wird.

Die in Erlangen für den Hausbau benützten Rohstoffe stammten, und so ist es zum Großteil auch noch heutzutage, überwiegend aus der unmittelbaren oder näheren Umgebung. Es wurde bereits erwähnt, daß der Sandstein des Burgbergs teilweise erhöhte Urangehalte aufweist. Und eben dieser Sandstein wurde früher in Gruben gebrochen und für den Hausbau verwendet. Auch



Abbildung 3: Wohnungsmeßstellen und Meßstellen in sonstigen Gebäuden (● im Stadtplan) zur Bestimmung der terrestrischen Ortsdosisleistung im Stadtgebiet Erlangen [25].

Häusertyp, Baumaterial	Anzahl n	$\dot{J}$ in $\mu R/h$	$\dot{J}_t$ in $\mu R/h$	Maximale Streubreite von $\dot{J}_t$ in $\mu R/h$	G_{exp} in $\mu R/h$
Sandsteinhäuser	2	15.6 ± 1.4	12.6 ± 1.4	11.6 - 13.6	± 1.2
Betonhochhäuser und Wohnblocks in moderner Bauweise	14	9.1 ± 0.9	6.1 ± 0.9	4.9 - 7.3	± 0.7
Altbauten (bis ca. 1960), Ziegel	25	12.8 ± 2.2	9.8 ± 2.2	5.2 - 14.6	± 1.0
Neubauten (nach ca. 1960), Ziegel	25	11.6 ± 2.0	8.6 ± 2.0	5.4 - 13.0	± 0.9
Einzelhäuser in moderner Bauweise, Fertighäuser, Bungalows	2	9.0 ± 2.7	6.0 ± 2.7	4.1 - 7.9	± 0.7

Tabelle 7: Terrestrische Ortsdosisleistung in Wohnungen.

der im Erlanger Raum für die Ziegelherstellung verarbeitete Ton und Lehm weist einen hohen Gehalt an natürlichen Radionukliden auf. So ist es nicht verwunderlich, daß sich die höchsten Meßwerte in älteren Sandstein- und Ziegelhäusern finden. In einem um die Jahrhundertwende errichteten Ziegelhaus wurde mit $14.6 \mu\text{R/h}$ der höchste Einzelmeßwert bestimmt, die beiden nächst hohen mit jeweils $13.6 \mu\text{R/h}$ wiederum in einem alten Ziegelhaus bzw. Sandsteinhaus.

Im Gebiet von Erlangen enthält der zur Betonherstellung benötigte Sand und Kies die natürlichen Radionuklide in unterdurchschnittlichen Konzentrationen. Die niedrigsten Meßwerte finden sich auch dementsprechend in Betonhochhäusern, Wohnblocks in moderner Bauweise (Beton/Ziegel usw.) und in modernen Einzelhäusern. Mit $4.1 \mu\text{R/h}$ wurde der niedrigste Einzelmeßwert in einem modernen Fertighaus ermittelt; ein Wert von $4.3 \mu\text{R/h}$ ergab sich in einem Betonhochhaus.

Die Stockwerkslage einer Wohnung hat keinen Einfluß auf die dortige Ortsdosisleistung. Zur Verdeutlichung dieser Tatsache sind im folgenden die Einzelmeßwerte von drei verschiedenen Wohnungen im gleichen Haus aber in unterschiedlichen Etagen angeführt: Parterre $11.6 \mu\text{R/h}$, I. Stock $10.8 \mu\text{R/h}$, II. Stock $10.9 \mu\text{R/h}$. Auch weitere Vergleiche zeigen, daß kein signifikanter Unterschied bei der Ortsdosisleistung von in verschiedenen Stockwerken gelegenen Wohnungen zu finden ist.

3.2.1.2. Vergleich mit früheren Meßwerten

In der nachfolgenden Tabelle 8 sind die eigenen Ergebnisse denen aus [19] für die entsprechenden Ge-

bäudetyphen gegenübergestellt.

Häusertyp, Baumaterial	$\bar{J}_t(\text{TLD})$ in $\mu\text{R/h}$	$\bar{J}_t[19]$ in $\mu\text{R/h}$	$\frac{\bar{J}_t(\text{TLD})}{\bar{J}_t[19]}$
Sandsteinhäuser	12.6 ± 1.4	7.8 ± 1.6	1.616
Betonhochhäuser und Wohnblocks in moderner Bauweise	6.1 ± 0.9	5.3 ± 1.5	1.151
Altbauten (bis ca. 1960), Ziegel	9.8 ± 2.2	8.0 ± 1.5	1.121
Neubauten (nach ca. 1960), Ziegel	8.6 ± 2.0	6.5 ± 1.2	1.323
Einzelhäuser in moderner Bauweise, Fertighäuser, Bungalows	6.0 ± 2.7	4.6 ± 1.2	1.239

Tabelle 8: Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung ($\mu\text{R/h}$) in Erlanger Wohnungen; Vergleich mit Ergebnissen aus [19].

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Korrelation der Ortsdosisleistungswerte mit Gebäudeart, Gebäudematerial und Baujahr. Die Gegenüberstellung verdeutlicht aber auch, daß die eigenen Mittelwerte im Durchschnitt um etwa 29 % über den in [19] gefundenen Mittelwerten liegen. Bei einem Vergleich eigener Meßergebnisse mit solchen aus [19] für identische Wohnungen wird diese Tatsache bestätigt. Für diese Diskrepanz ist in erster Linie wiederum die hohe Energie- und Richtungsabhängigkeit der CaF_2 -Dosimeter verantwortlich zu machen, die nach

Gleichung (8) eine Überschätzung um hier durchschnittlich 27 % bedingt, in sehr guter Übereinstimmung mit dem experimentell gefundenen Wert von 29 %.

Während die TL-Dosimeter an einer Stelle in einer Wohnung ausgehängt waren, wurden in [19] die Ortsdosisleistungswerte in fast allen Räumen einer Wohnung gemessen und der Wohnungsmeßwert durch Mittelung dieser Einzelergebnisse bestimmt. Da bei den gefundenen Ortsdosisleistungsmittelwerten in [19] außerdem mehr Wohnungen berücksichtigt werden konnten, ist dieser Durchschnittswert besser gemittelt.

Hinzu kommt der Einfluß der zeitlichen Mittelung bei den TLD-Messungen. Bei geöffnetem Fenster hat sich nämlich der Radongehalt im Zimmer innerhalb einer Stunde dem im Freien angeglichen. Deshalb ergeben sich z.B. bei Messungen mit dem Szintillationszähler niedrigere Ortsdosisleistungswerte als vor dem Öffnen des Fensters [16].

3.2.2. Ortsdosisleistung in öffentlichen Gebäuden, Betriebs- und Geschäftsgebäuden

3.2.2.1. Eigene Meßergebnisse

Bei den Ortsdosisleistungsmessungen in öffentlichen Gebäuden, Betriebs- und Geschäftsgebäuden zeigte sich ein ähnlicher Einfluß der Baumaterialien wie bei den Wohnungen. Da es sich durchwegs um neuere Gebäude handelte, war lediglich eine Einteilung in nur zwei Untergruppen erforderlich. Für die Ziegelbauten ab ca. 1960 ergab sich eine mittlere Ortsdosisleistung für die terrestrische Strahlung von $6.6 \pm 0.4 \mu\text{R/h}$ (maximale Streubreite von 6.1 - 6.9 $\mu\text{R/h}$) und für

Gebäude in moderner Bauweise eine solche von $4.2 \pm 1.6 \mu\text{R/h}$ ($2.4 - 6.3 \mu\text{R/h}$). Der niedrigste Meßwert bei den Wohnungs- und Gebäudemessungen überhaupt wurde dabei in einem Betonhochhaus (Rathaus) mit $2.4 \mu\text{R/h}$ gefunden.

Der Unterschied von 1.9 bzw. 2.0 $\mu\text{R/h}$ der oben genannten Ortsdosisleistungsmittelwerte im Vergleich zu den entsprechenden Werten bei den Wohnungsmessungen (siehe Tabelle 7) läßt sich zum einen durch die geringe Anzahl der Meßorte erklären. Die Dosimeter hingen ausnahmslos in nicht mehr als zehn Jahre alten Gebäuden, die aus modernen Baumaterialien mit wahrscheinlich niedrigen Radionuklidgehalt errichtet worden sind, während die Ziegelbauten und Wohnblocks bei den Wohnungsmessungen teilweise fast zwanzig Jahre alt waren und damals noch Baustoffe mit teilweise höheren Radionuklidgehalt Verwendung fanden. Die Raumgröße hat in diesem Zusammenhang ebenfalls einen Einfluß, da die Dosimereinheiten in den öffentlichen Gebäuden zumeist in der Mitte von sehr großen Räumen oder sogar Hallen hingen, also weit von einer Mauer entfernt waren.

3.2.2.2. Vergleich mit früheren Meßwerten

Faßt man alle Meßwerte der beiden Untergruppen zu einer Gruppe zusammen, so ergibt sich ein Mittelwert für die terrestrische Ortsdosisleistung von $5.2 \pm 1.8 \mu\text{R/h}$ mit einer maximalen Streubreite von 2.4 bis 6.9 $\mu\text{R/h}$, der um 21 % über dem entsprechenden Vergleichswert in [19] von $4.3 \pm 1.0 \mu\text{R/h}$ liegt. Die Begründung hierfür ist die gleiche wie die, die bereits in Abschnitt 3.2.1.2. angeführt wurde. Nach Gleichung (8) errechnet sich eine Überschätzung der

terrestrischen Ortsdosisleistung bei den TLD-Messungen um durchschnittlich 27 %.

Bei einem Vergleich der in [19] für moderne Bauweise und Baustoffe ermittelten Durchschnittswerte für die terrestrische Ortsdosisleistung in Wohnungen und in öffentlichen Gebäuden, Betriebs- und Geschäftsgebäuden zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei den eigenen Ergebnissen. Der Mittelwert von $4.3 \pm 1.0 \mu\text{R/h}$ für die modernen Gebäude liegt tiefer als alle in den Wohnungen bei unterschiedlichen Häusertypen gefundenen Mittelwerte. Die eigenen, in Abschnitt 3.2.2.1. beschriebenen Vermutungen werden dadurch bestätigt.

3.2.3. Berechnung der mittleren Ortsdosisleistung in Gebäuden

Für die Berechnung der mittleren terrestrischen Ortsdosisleistung in Wohnungen wurde eine gegenüber [19] verbesserte Gewichtung nach Gebäudetypen und Baumaterialien verwendet, die durch von der Stadt Erlangen, Abteilung Stadtforschung und Statistik, mitgeteilte Zahlen belegt ist [24]. Zusätzlich wurde von den Annahmen ausgegangen, daß alle Wohnungen bis 1959 in Naturstein- oder Ziegelbauweise errichtet worden sind und für Wohnungen ab dem Jahre 1960 ein Anteil von 75 % für Ziegelbauweise und von 25 % für Fertighäuser, Beton- und moderne Mischbauweise besteht. Für die Aufstellung der Tabelle 9 mußten deshalb die Gruppen "Sandsteinhäuser" und "Altbauten (bis ca. 1960), Ziegel" sowie "Betonhochhäuser und Wohnblocks in moderner Bauweise" und "Einzelhäuser in moderner Bauweise" zu jeweils einer Gruppe zusammengefaßt und die neuen Mittelwerte für die terrestrische Ortsdosisleistung berechnet werden.

Häusertyp, Baumaterial, Baujahr	Anteil in %	$\bar{J}_t$ in $\mu R/h$	$\bar{G}_{exp}$ in $\mu R/h$
Natursteinhäuser und Alt- Bauten (bis ca. 1960), Ziegel	51.3	10.0 ± 2.2	± 1.0
Neubauten (ab ca. 1960), Ziegel	36.5	8.6 ± 2.0	± 0.9
Betonhochhäuser, moderne Mischbauweise, Fertig- häuser	12.2	6.1 ± 1.1	± 0.7
Gewichteter Mittelwert	100.0	9.0 ± 1.4	± 0.6

Tabelle 9: Anteile der verschiedenen Gebäudetypen in %
und deren mittlere terrestrische Ortsdosis-
leistung in $\mu R/h$.

Der Unterschied zwischen dem einfachen Gesamtmittelwert für die terrestrische Ortsdosisleistung in Wohnungen und dem gewichteten Mittelwert beträgt nur $0.4 \mu R/h$. Diese gute Übereinstimmung verdeutlicht, daß die vorliegende Stichprobe im Rahmen der Genauigkeit der Methode annähernd repräsentativ für die in Erlangen vorkommenden Häuserbauarten und Baumaterialien ist.

Der gewichtete Wohnungsmittelwert liegt um 39 % über dem in [19] errechneten Wohnungsmittelwert von $6.5 \pm 1.2 \mu R/h$. Diese Differenz ist größtenteils wieder auf die hohe Energie- und Richtungsabhängigkeit der CaF_2 -Dosimeter zurückzuführen (Sollwert nach Gleichung (8): 27 %), beruht aber auch auf der unterschiedlichen Gewichtung der einzelnen Bauart-Anteile.

Verwendet man nämlich bei einer Neuberechnung die Meßwerte aus [19] und die eigene Gewichtung, so ergibt sich ein Wohnungsmittelwert von $7.0 \pm 1.3 \mu\text{R/h}$, gegenüber dem der eigene Wert nur noch um 29 % höher ist.

Bei den älteren öffentlichen Gebäuden, Betriebs- und Geschäftsgebäuden handelt es sich größtenteils um Naturstein- und Ziegelbauten (z.B. viele Universitätsinstitute). Da für diese Gebäude keine eigenen Meßergebnisse vorlagen, mußte der zugehörige Mittelwert der terrestrischen Ortsdosisleistung aus den Wohnungsmesswerten abgeschätzt werden. Es wurde der entsprechende Wohnungsmittelwert von $10.0 \pm 2.2 \mu\text{R/h}$ eingesetzt. Für die Verteilung wurde wie in [19] ein Anteil von je 50 % für die alte Naturstein- und Ziegelbauweise bzw. für die moderne Beton- und Mischbauweise und die neueren Ziegelbauten angenommen. So ergibt sich eine mittlere terrestrische Ortsdosisleistung von $7.6 \pm 1.4 \mu\text{R/h}$ für die öffentlichen Gebäude, Betriebs- und Geschäftsgebäude, also um rund 25 % mehr als der entsprechende Wert aus [19] von $6.1 \pm 1.0 \mu\text{R/h}$ (Sollwert nach Gleichung (8): 27 %).

Der gewichtete Wohnungsmittelwert für die terrestrische Strahlung liegt um $2.6 \mu\text{R/h}$ über dem Mittelwert für bebautes Gelände und um $3.6 \mu\text{R/h}$ über demjenigen für freies Gelände. In [19] fanden sich Differenzen von 2.2 bzw. 2.8 $\mu\text{R/h}$. Dieser Unterschied von rund 20 % verdeutlicht erneut die Energie- und Richtungsabhängigkeit der CaF_2 -Dosimeter.

3.3. Die terrestrische Strahlenexposition im Stadtgebiet Erlangen

3.3.1. Berechnungsmethode

"Eine exakte Bestimmung der mittleren terrestrischen Strahlenexposition der Bevölkerung, ihrer Häufigkeitsverteilung und Streubreite würde die Messung der Personendosen durch die terrestrische Strahlung in einer statistisch signifikanten Bevölkerungsstichprobe erfordern" [19]. Mit Hilfe der bereichsweise gewichteten Durchschnittswerte für die verschiedenen Aufenthaltsgebiete und der entsprechenden durchschnittlichen Aufenthaltszeiten kann diese Berechnung jedoch näherungsweise durchgeführt werden. Die relativ kleine Anzahl der eigenen Meßwerte und die daraus errechneten großräumigen Bereichsmittelwerte bedingen, daß die eigene Abschätzung mit einer größeren Unsicherheit hinsichtlich ihrer Repräsentativität als die in [19] verbunden ist, zumal außerdem auf die in [19] für das gesamte Stadtgebiet durchgeführte, kleinräumige Mittelung mit Gewichtung nach Wohnbevölkerungs- und Beschäftigtendichte verzichtet werden mußte.

Bei der eigenen Berechnung wurden große Bereiche mit verhältnismäßig einheitlicher Ortsdosisleistung bzw. relativ hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit für durchschnittliche Erlanger Stadtbewohner ausgewählt: Freies Gelände, bebautes Gelände (untergliedert in Innenstadt und Außenbezirke), Wohnung und Arbeitsplatz bzw. öffentliche Gebäude. Eine genauere Untergliederung würde einen unverhältnismäßig großen Aufwand verursachen und ist auch deshalb nicht erforderlich, weil sich die Bevölkerung überwiegend in Gebäuden aufhält

und sich daher nur kleine Änderungen in der mittleren jährlichen Äquivalentdosis ergeben würden.

Die mittlere jährliche Äquivalentdosis für Gonaden und Knochenmark durch die terrestrische Strahlung errechnet sich aus folgender Gleichung:

$$\overline{\dot{H}}_t = 7.618 \cdot \left[c \cdot \left(\sum_1 g_1 \overline{\dot{J}}_{t,1} \right) + c' \cdot \left(\sum_1 g_1' \overline{\dot{J}}_{t,1}' \right) \right] ,$$

mit: $\overline{\dot{H}}_t$: Mittlere jährliche Äquivalentdosis (Gonaden und Knochenmark) durch die terrestrische Strahlung in mrem/a.

c, c' : Dosiskonversionsfaktoren für Gonaden und Knochenmark zu Luft:

$c = 0.8$ bei Exposition im Freien [27]

$c' = 0.7$ bei Exposition in Gebäuden [27]

g_1, g_1' : Anteil der Aufenthaltsdauer in den einzelnen Bereichen im Freien (g_1) bzw. in Gebäuden (g_1').
 $\left(\sum (g_1 + g_1') = 1 \right)$

$\overline{\dot{J}}_{t,1}, \overline{\dot{J}}_{t,1}'$: Bereichsweise gewichtete Mittelwerte der terrestrischen Ortsdosisleistung in den einzelnen Bereichen im Freien bzw. in den Gebäuden in $\mu R/h$.

Der Zahlenfaktor 7.618 ergibt sich aus der Umrechnung von $\mu R/h$ in mrem/a mit einem Qualitätsfaktor für die terrestrische Strahlung von 1. Dieser gegenüber [19] etwas veränderte Zahlenwert ist bedingt durch den hier verwendeten Umrechnungsfaktor $0.869 (rd/R)_{Luft}$ [28], statt $0.877 (rd/R)_{Luft}$ in [19].

Die Abschätzung der mittleren Aufenthaltszeiten in den verschiedenen Bereichen wurde unverändert aus [19]

übernommen. In Tabelle 10 sind diese Werte zusammen mit den zugeordneten Ortsdosisleistungsmittelwerten für die einzelnen Aufenthaltsbereiche angegeben.

Bereich	Mittlere Aufenthaltsdauer in %		Mittlere Ortsdosisleistung $\bar{J}_t$ in $\mu R/h$	σ_{exp} in $\mu R/h$
	Erwerbstätige	Nichterwerbstätige		
Im Freien	12.0	14.6	---	---
Freies Gelände	4.5	6.0	5.4 ± 1.4	± 0.8
Innenstadt	2.1	1.2	6.8 ± 1.4	± 1.0
Außenbezirke	5.4	7.4	6.1 ± 1.4	± 0.9
In Gebäuden	88.0	85.4	---	---
Wohnung	61.2	81.8	9.0 ± 1.4	± 0.6
Arbeitsplatz, öffentliche Gebäude	26.8	3.6	7.6 ± 1.4	± 0.4

Tabelle 10: Mittlere Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung und mittlere Aufenthaltszeiten in den einzelnen Aufenthaltsbereichen.

3.3.2. Mittlere jährliche terrestrische Strahlenexposition im Stadtgebiet Erlangen

Die mittlere jährliche Äquivalentdosis für Gonaden und Knochenmark durch die terrestrische Strahlung berechnet sich nach obiger Gleichung und Tabelle 10 für Erwerbstätige zu 44.6 ± 5.0 mrem/a und für Nichterwerbstätige zu 45.9 ± 6.2 mrem/a. Der vernachlässigbar kleine

Unterschied bei diesen Äquivalentdosen für Erwerbstätige und Nichterwerbstätige beruht auf der Tatsache, daß sich beide Gruppen überwiegend in Gebäuden aufhalten und die Differenz zwischen den mittleren Ortsdosisleistungen in Wohnungen und öffentlichen Gebäuden nur gering ist.

Bei einem Verhältnis von ca. 45 % Erwerbstätigen und ca. 55 % Nichterwerbstätigen in Erlangen ergibt sich als Gesamtmittelwert:

$$\bar{H}_t = 45.3 \pm 4.1 \text{ mrem/a}$$

Dieser Wert liegt um 35.6 % über dem in [19] erhaltenen Gesamtmittelwert von 33.4 ± 3.5 mrem/a. Setzt man jedoch bei der Auswertung in [19] in die Berechnungsformel für $\bar{H}_t$ den nach der hier verwendeten Gewichtung ermittelten Wohnungsmittelwert von $7.0 \mu\text{R/h}$ und den abgeänderten Umrechnungsfaktor ($\text{mrem} \cdot \text{a}^{-1} / \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$) für Luft ein, so errechnet sich ein Wert von 35.0 ± 3.5 mrem/a, gegenüber dem der eigene Gesamtmittelwert um 29.4 % höher liegt. Berücksichtigt man ferner die systematische Überschätzung der terrestrischen Ortsdosisleistungswerte bei den TLD-Messungen nach Gleichung (8), so ergibt sich eine korrigierte mittlere Äquivalentdosis durch die terrestrische Strahlung von 35.7 mrem/a, in hervorragender Übereinstimmung mit dem in [19] angegebenen Wert.

Aus den eigenen Ergebnissen errechnet sich für die mittlere terrestrische Strahlenexposition bei Daueraufenthalt im Freien ein Wert von 36.0 mrem/a (korrigiert nach Gleichung (8): 28.0 mrem/a) und bei Daueraufenthalt in Gebäuden ein solcher von 46.8 mrem/a (korrigiert nach Gleichung (8): 36.9 mrem/a). Die

Vergleichswerte aus [19] betragen 25.3 bzw. 36.6 mrem/a. Die unter diesen Annahmen gefundenen Werte werden in der Literatur häufig als Orientierungsgrößen angegeben.

Die notwendigen Annahmen über die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für die Berechnung der Streubreite der terrestrischen Strahlenexposition der Erlanger Bevölkerung bei minimaler und maximaler Strahlenbelastung wurden unverändert aus [19] übernommen.

Minimale terrestrische Strahlenexposition: Nichterwerbstätige Personen mit Wohnung in einem Fertighaus in einem Außenbezirk der Stadt, bei Aufenthalt ganz überwiegend in der Wohnung und im Wohnbereich:

Bereich	Aufenthaltsdauer		$\bar{J}_t$ in $\mu R/h$
	in h/Woche	in %	
Im Freien:			
Wohnbereich	7	4.2	6.1
Freies Gelände	7	4.2	5.4
In Gebäuden:			
Geschäftsgebäude (Betonbauweise)	3	1.8	6.1
Wohnung	151	89.8	6.0

Maximale terrestrische Strahlenexposition: Erwerbstätige Personen mit einer Wohnung in einem Natursteinhaus in der Innenstadt mit der maximalen gemessenen Ortsdosisleistung in Wohnungen; außergewöhnlich langer Aufenthalt am Arbeitsplatz in einem öffentlichen Ge-

bäude der Innenstadt, ebenfalls in Natursteinbauweise:

Bereich	Aufenthaltsdauer		$\bar{J}_t$ in $\mu R/h$
	in h/Woche	in %	
Im Freien:			
Innenstadt	7	4.2	6.8
Freies Gelände	3	1.8	5.4
In Gebäuden:			
Arbeitsplatz	52	30.9	14.6
Geschäftsgebäude	7	4.2	7.6
Wohnung	99	58.9	14.6

Daraus erhält man eine wahrscheinliche Streubreite der terrestrischen Strahlenexposition für Gonaden und Knochenmark im Stadtgebiet Erlangen von 32.2 bis 73.9 mrem/a (korrigiert nach Gleichung (8): 26.0 bis 57.5 mrem/a). In [19] wurden Werte (korrigiert mit Faktor 7.618) von 13.0 bzw. 55.3 mrem/a gefunden. Der große Unterschied für die minimale terrestrische Strahlenexposition erklärt sich durch den niedrigen Ortsdosisleistungswert für die Wohnung in [19].

3.3.3. Vergleich mit Literaturwerten

Tabelle 11 zeigt die in Erlangen mit verschiedenen Meßmethoden ermittelten Werte für die terrestrische Strahlenexposition (Gonaden und Knochenmark) im Vergleich mit Ergebnissen von regionalen, nationalen und globalen Untersuchungen:

Jährliche Äquivalentdosis für Gonaden und Knochenmark in mrem/a			
	Mittelwert	Daueraufenthalt im Freien	Daueraufenthalt in Gebäuden
Erlangen-Stadt (Ergebnisse mit TL-Dosimetern)	35.7 (26.0 - 57.5) ⁺	28.0 ⁺	36.9 ⁺
Erlangen-Stadt (Ergebnisse mit Szintillationsdosi- metern [19])	35.0 (13.0 - 55.3) ⁺⁺	25.3 ⁺⁺	36.6 ⁺⁺
Mittelfranken [6]	(61) ⁺⁺⁺	50 (22 - 165)	64 (28 - 101)
Nordwestliches Bayern [8]	45 - 60	-----	-----
Bayern [6]	(59) ⁺⁺⁺	50	61
BRD-Mittelwert [6]	50	43 (4 - 291)	57 (11 - 243)
Weltmittelwert [28]	32	-----	-----

Tabelle 11: Mittlere Strahlenexposition von Gonaden und Knochenmark durch die terrestrische Strahlung.

⁺: Eigene Ergebnisse, korrigiert für die Energie- und Richtungsabhängigkeit der CaF₂-Dosimeteranzeige nach Gleichung (8).

⁺⁺: Werte umgerechnet mit Faktor $7.618 \text{ mrd} \cdot \text{a}^{-1} / \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$ für Luft und neu gewichteten Wohnungsmittelwert.

⁺⁺⁺: Berechnet mit einer Aufenthaltswahrscheinlichkeit in Gebäuden von 80 %.

Aus dieser Zusammenstellung ist ersichtlich, daß die korrigierten eigenen Ergebnisse ebenso wie die nach [19] niedriger sind als die Vergleichswerte für Mittelfranken, das nordwestliche Bayern, das Land Bayern und die Bundesrepublik. Ein Grund hierfür sind sicher die besonderen geologischen Verhältnisse im Stadtgebiet Erlangen. Vor allem die weit verbreiteten mächtigen quartären Terrassenaufschüttungen mit ihrem relativ geringen Gehalt an natürlichen Radionukliden und die in Erlangen vorwiegend verwendeten Baustoffe lokalen Ursprungs sind dafür verantwortlich zu machen.

Da bei den Messungen für [19] drei verschiedene Szintillationsdosisleistungsmeßgeräte mit einem jeweils unterschiedlichen Anzeigewert für die kosmische Strahlung verwendet wurden, ist bei den eigenen Ergebnissen die Unsicherheit der Korrektur für die kosmische Strahlung wesentlich geringer. Selbst wenn von einer Überschätzung der TLD-Anzeige für die kosmische Strahlung um 14 % [17] ausgegangen wird, ergibt sich nach Gleichung (8) eine mittlere terrestrische Strahlenexposition im Stadtgebiet Erlangen von 37.4 mrem/a, die nur um 4.8 % höher liegt als der oben angegebene korrigierte Wert.

3.4. Mittlere natürliche Strahlenexposition im Stadtgebiet Erlangen

Für die Berechnung der gesamten natürlichen Strahlenexposition müssen zur terrestrischen Strahlenexposition noch die Beiträge der kosmischen Strahlung und der natürlichen Strahlenexposition von innen addiert werden. Die beiden letztgenannten Anteile können innerhalb des Stadtgebietes Erlangen als im Mittel konstant angesehen werden.

Mittlere Strahlenexposition durch die kosmische Strahlung in Erlangen:	24.6 mrem/a
Bei Daueraufenthalt im Freien:	29.8 mrem/a
Bei Daueraufenthalt in Gebäuden:	23.8 mrem/a
Unter der Annahme minimaler Exposition:	24.3 mrem/a
Unter der Annahme maximaler Exposition:	24.2 mrem/a

Natürliche Strahlenexposition von innen
(Durchschnittswert für die BRD [7]): 30.0 mrem/a

Zusammenfassend ergibt sich somit für die Bevölkerung Erlangens eine mittlere natürliche Strahlenexposition von 90 mrem/a mit einem Schwankungsbereich von 80 bis 112 mrem/a. Bei Daueraufenthalt im Freien beträgt die jährliche Gesamtäquivalentdosis im Mittel 88 mrem/a, bei Daueraufenthalt in Gebäuden 91 mrem/a.

4. Fehlerbetrachtung

Aus der Bestimmungsgleichung für die Ortsdosisleistung (siehe Gleichung (6) auf Seite 27) erhält man nach Einsetzen von Gleichung (3), Seite 26, und mit $A_0 \ll A_P$ folgende Beziehung für den mittleren relativen experimentellen Fehler der Ortsdosisleistung:

$$\frac{\tilde{\sigma}_j}{j} = \pm \left[\left(\frac{\tilde{\sigma}_{A_P}}{A_P} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_\xi}{\xi} \right)^2 + \left(\frac{A_0}{A_P \cdot f(A_K, A_F)} \right)^2 \cdot \left(\frac{\tilde{\sigma}_{A_0}}{A_0} \right)^2 + \left(\frac{A_F}{A_K - A_F} - \frac{1}{\ln \frac{A_K}{A_F}} \right)^2 \left\{ \left(\frac{\tilde{\sigma}_{A_K}}{A_K} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{A_F}}{A_F} \right)^2 \right\} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

$$\text{mit: } f(A_K, A_F) = \frac{\ln \frac{A_K}{A_F}}{\left(1 - \frac{A_F}{A_K} \right)}.$$

Die $\tilde{\sigma}$ -Werte auf der rechten Seite der Gleichung bedeuten dabei die experimentellen Meßunsicherheiten der Bestimmungsgrößen A_P , ξ , A_0 , A_K und A_F .

Als Werte wurden dazu ermittelt und eingesetzt: Für $\tilde{\sigma}_{A_P}/A_P$ die relative Standardabweichung der relativen Anzeige infolge der Inhomogenität innerhalb der Dosimetergruppen (siehe Seiten 14 und 15), für $\tilde{\sigma}_\xi/\xi$ und $\tilde{\sigma}_{A_0}/A_0$ die relativen Standardabweichungen von Steigung und Achsenabschnitt der jeweiligen Kalibriergeraden (siehe Seite 22) und für $\tilde{\sigma}_{A_K}/A_K$ und $\tilde{\sigma}_{A_F}/A_F$ die

relativen Standardabweichungen der mittleren Anzeigen der Kontroll- und Fadingproben. Die einzelnen Werte in % sind in der folgenden Tabelle für die drei Dosimetergruppen zusammengestellt.

	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
σ_{A_I}/A_P in %	± 7.9	± 0.6	± 0.7
$\sigma_{\varepsilon}/\varepsilon$ in %	± 1.1	± 0.8	± 1.1
σ_{f_o}/A_o in %	± 22.0	± 16.6	± 14.5
σ_{A_K}/A_K in %	± 5.3	± 7.7	± 3.2
σ_{A_F}/A_F in %	± 6.1	± 5.7	± 4.7

Die Ausdrücke in Klammern auf der rechten Seite von Gleichung (9) wurden aus den Mittelwerten der jeweiligen Bestimmungsgrößen abgeschätzt. Dabei ergab sich

$$\left(\frac{A_F}{A_K - A_F} - \frac{1}{\ln \frac{A_K}{A_F}} \right) \approx 0.5 \quad \text{für alle drei Dosimeter-}$$

gruppen und $A_o / [A_P \cdot f(A_K, A_F)] \approx 0.06$ für Gruppe I, ≈ 0.04 für Gruppe II und ≈ 0.09 für Gruppe III.

Damit erhält man als relativen experimentellen Fehler der Ortsdosisleistung:

$$\sigma_j/j = \begin{cases} \pm 9.0 \% \text{ für Gruppe I} \\ \pm 8.2 \% \text{ für Gruppe II} \\ \pm 7.5 \% \text{ für Gruppe III} \end{cases}$$

Für den experimentellen Fehler der terrestrischen Ortsdosisleistung gilt die Beziehung:

$$\tilde{\sigma}_{j_t} = \tilde{\sigma}_j = \left(\frac{\tilde{\sigma}_j}{\dot{j}} \right) \cdot \dot{j} .$$

Die so berechneten experimentellen Meßunsicherheiten $\tilde{\sigma}_{\text{exp}}$ der einzelnen $\dot{j}_t$ -Mittelwerte sind in den Tabellen 6, 7, 9 und 10 angegeben. Der Vergleich mit den dort ebenfalls angegebenen Standardabweichungen zeigt, daß die Zusammenfassung zu den gewählten Bereichs- und Bauart- bzw. Baumaterialgruppen innerhalb der experimentellen Meßunsicherheit der Methode statistisch einigermaßen gerechtfertigt ist.

Aus der Bestimmungsgleichung für die mittlere terrestrische Strahlenexposition (siehe Seite 56) berechnet sich mit den Werten für die experimentelle Meßunsicherheit der einzelnen Ortsdosisleistungswerte ein mittlerer experimenteller Gesamtfehler von ± 1.7 mrem/a oder ± 3.8 %, gegenüber einem statistischen Gesamtfehler von ± 4.1 mrem/a oder ± 9.1 %, wie er sich aus den Standardabweichungen der Ortsdosisleistungsmittelwerte ergibt. Angesichts der wenn auch nicht willkürlichen, so doch notwendigerweise groben Zusammenfassung der Einzelergebnisse zu Gruppenmittelwerten und der Kleinheit der verwendeten Stichprobe kann dieser Unterschied zwischen experimentellen und statistischen Fehler als nicht gravierend betrachtet werden.

5. Schluß

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit zeigt, daß im Stadtgebiet Erlangen die korrigierte mittlere terrestrische Strahlenexposition der Bevölkerung 35.7 mrem/a beträgt, was einem Anteil von etwa 40 % an der gesamten natürlichen Strahlenexposition von im Mittel 90 mrem/a entspricht. Die Schwankungsbreite der terrestrischen Strahlenexposition reicht von 26.0 bis 57.5 mrem/a. Bei Daueraufenthalt im Freien ergibt sich eine mittlere terrestrische Strahlenexposition von 28.0 mrem/a, bei Daueraufenthalt in Gebäuden eine solche von 36.9 mrem/a.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, daß der Mittelwert für die jährliche terrestrische Äquivalentdosis (Gonaden und Knochenmark) für die Bevölkerung Erlangens überwiegend durch die terrestrische Strahlenexposition in Gebäuden bedingt ist. Da sich die Bevölkerung durchschnittlich zu mehr als 85 % der Zeit in Wohnungen und anderen Gebäuden aufhält, ist dieser Sachverhalt nicht verwunderlich.

Zum anderen zeigen die gefundenen mittleren Ortsdosisleistungswerte im Freien und in Gebäuden, daß die Höhe der terrestrischen Strahlung in einem direkten Zusammenhang mit dem Gehalt des geologischen Untergrunds, der verwendeten Häuserbaustoffe und der Straßenbaumaterialien an natürlichen Radionukliden steht. So liegt der Mittelwert der terrestrischen Ortsdosisleistung in den Außenbezirken, für die die aufgelockerte Struktur mit Häusern und Straßen in moderner Bauweise und eingestreute Grünflächen charakteristisch ist, in der Mitte zwischen den Meßwerten im freien Gelände und in der Innenstadt, die eine

dichte und ältere Bebauung aufweist. Die Messungen der Ortsdosisleistung durch die terrestrische Strahlung in den Gebäuden beweisen, daß diese Ergebnisse stark durch die verwendeten Baumaterialien beeinflusst werden.

Während die mit den CaF_2 -Dosimetern bestimmten Ortsdosen über einen Zeitraum von etwa drei Monaten vorwiegend tageszeitliche und witterungsbedingte Schwankungen erfaßten, konnten mit den in [19] verwendeten Szintillationsdosimetern ein räumlich dichtes Netz abgedeckt und die Ergebnisse durch lokale Mittelung berechnet werden. Bei dem in dieser Arbeit ständig vorgenommenen Vergleich der eigenen korrigierten Ergebnisse mit den entsprechenden Werten aus [19] zeigt sich größtenteils eine gute Übereinstimmung. Insgesamt gesehen werden die in [19] gefundenen Ergebnisse und Sachverhalte durch die eigene Arbeit bestätigt.

Die Nachteile bei Verwendung von TL-Dosimetern sind zum einen die vielen zeitraubenden Arbeitsgänge bei der Vorbereitung und Auswertung der Messungen und die Dauer der Messungen selbst und zum anderen die starke Energie- und Richtungsabhängigkeit der relativen Dosimeteranzeige. Weiträumige, umfangreiche Untersuchungen zur Ortsdosisleistung können deshalb mit wesentlich geringeren Arbeits- und damit Zeitaufwand und trotz allem guter Genauigkeit mit Szintillationsdosimetern durchgeführt werden. Die Verwendung der zudem auch sehr teureren TL-Dosimeter wird wahrscheinlich der Messung von Stichproben von Personendosen und von Ortsdosisleistungsprofilen vorbehalten bleiben.

Die beiden unabhängigen Untersuchungen über die

terrestrische Strahlenexposition im Stadtgebiet Erlangen werden augenblicklich durch zwei weitere Arbeiten überprüft. In der einen sollen mit Hilfe von neu konstruierten Dosimeterkapseln und der damit verbundenen Verbesserung der Energie- und Richtungsabhängigkeit der relativen Dosimeteranzeige die eigenen und die Ergebnisse aus [19] bestätigt werden, in der anderen werden mit eben diesen verbesserten Dosimeter-einheiten direkt Personendosen bestimmt.

Literatur

- [1] Adams, J.A.S., Lowder, W.M. (Eds.):
"The Natural Radiation Environment"
Chicago: The University Press 1964, Seite 885,
907, 919.
- [2] Almond, P.R., McCray, K.:
"The Energy Response of LiF , CaF_2 and $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$
to High Energy Radiations"
Phys. Med. Biol. 15 (1970), 335.
- [3] Aurand, K., Bückner, W., Hug, O., Jacobi, W., Kaul,
A., Muth, H., Pohlit, W., Stahlhofen, W., (Heraus-
geber):
"Die natürliche Strahlenexposition des Menschen"
Stuttgart: Georg Thieme Verlag 1974.
- [4] Becker, K.:
"Environmental Monitoring with TLD"
Nucl. Instr. Meth. 104 (1972), 405.
- [5] Binder, W., and Cameron, J.R.:
"Dosimetric Properties of $\text{CaF}_2\text{:Dy}$ "
Health Phys. 17 (1969), 613.
- [6] Bundesministerium des Innern:
"Die Strahlenexposition von außen in der Bundes-
republik Deutschland durch natürliche radioaktive
Stoffe im Freien und in Wohnungen unter Berücksichtigung des Einflusses von Baustoffen"
Bericht über ein vom Bundesminister des Innern
gefördertes Forschungsvorhaben, 1978.

- [7] Bundesministerium des Innern:
"Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung",
Jahresbericht 1976.
- [8] Bonka, H.:
Atomkernenergie 23 (1974), 137.
- [9] Cardinale, C.L., Frittelli, L., Lembo, G., Gera,
F., Ilari, O.:
Health Phys. 20 (1971), 285.
- [10] Deutsche Normen:
"Dosismessverfahren in der radiologischen Technik,
Radio-Thermolumineszenz-Dosimetrie"
DIN 6800, Blatt 5, Entwurf Februar 1975
Berlin: Beuth-Verlag 1975.
- [11] Doke, T., Takahashi, H., Higashimura, T.,
Takeuchi, M., Nagahara, Y., Watanabe, H., Otsuka,
H., Okano, M., Yamasaki, F.:
Sci. Papers I.P.C.R. 56 (1962), 40.
- [12] Hoy, J.E.:
"Environmental Radiation Monitoring With Thermo-
luminescent Dosimeters"
Health Phys. 21 (1971), 860.
- [13] Jones, D.E., Lindeken, C.L., McMillen, R.E.:
"Natural Radiation Background Dose Measurements
With $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ TLD"
Proc. Third Intern. Conf. on Luminescence Dosi-
metry,
Risø Report No. 249 (1971), 985.

- [14] Krämer, K.:
"Systematische Untersuchung der Eigenschaften von
Thermolumineszenz-Dosimetern für Zwecke der Rönt-
gendiagnostik und -therapie"
Dissertation Erlangen 1975.
- [15] Lindeken, C.L., Jones, D.E., McMillen, R.E.:
Health Phys. 24 (1973), 81.
- [16] National Council On Radiation Protection And
Measurements (NRCP):
"Environmental Radiation Measurements"
NRCP Report No. 50, Washington D.C. 1976.
- [17] O'Brien, K.:
"The Response of LiF Thermoluminescence Dosimeters
to the Ground-Level Cosmic-Ray Background"
Int. J. Appl. Radiat. Isotop. 29 (1978), 735.
- [18] O'Brien, K., McLaughlin, J.E.:
"The Radiation Dose to Man from Galactic Cosmic
Rays"
Health Phys. 22 (1972), 225.
- [19] Pfister, H., Philipp, G., Pauly, H.:
"Die terrestrische Strahlenexposition im Stadt-
gebiet Erlangen"
Institut für Radiologie der Universität Erlangen-
Nürnberg,
Interner Bericht, Erlangen 1978.
- [20] Pfister, H.:
Persönliche Mitteilung

- [21] Pohl, E., Steinhäusler, F., Hofmann, W.,
Pohl-Rüling, J.:
In: International Atomic Energy Agency:
"Biological and Environmental Effects of Low-
Level Radiation"
Vol. II, Seite 305, Wien 1976.
- [22] Schreglmann, E.J.:
"Ein sterilisierbares Dosimeter zur Messung der
Strahlenbelastung der Hände bei Operationen
unter Durchleuchtungskontrolle"
Dissertation, Erlangen 1976.
- [23] Seibert, A.:
"Messung der Dosisbelastung der Augen mit LiF-
Dosimetern bei den in der Zahn-, Mund- und
Kieferklinik üblichen röntgendiagnostischen
Untersuchungstechniken"
Dissertation, Erlangen 1974.
- [24] Stadt Erlangen, Abt. Stadtforschung und Statistik:
Persönliche Mitteilung.
- [25] Nach "Stadtplan Erlangen" 1:15000, 21. Auflage.
Erlangen: Universitäts-Buchdruckerei Junge &
Sohn, Oktober 1978.
- [26] Sukis, D.R.:
"Thermoluminescent Properties of $\text{CaF}_2\text{:Dy}$ TLD's"
IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-18 (1971), 185.
- [27] UNSCEAR:
Report of the United Nations Scientific Committee
on the Effects of Atomic Radiation, Vol. I: Levels.
New York 1972, Seite 38.

- [28] UNSCEAR:
Report of the United Nations Scientific Committee
on the Effects of Atomic Radiation.
General Assembly, Official Records: Thirty-Second
Session.
Suppl. No. 40 (A/32/40), New York 1977.
- [29] Yeates, D.B., King, B.E.:
Health Phys. 25 (1973), 373.

Herrn Prof. Dr. Dr. H. Pauly möchte ich an dieser Stelle für die Überlassung des Themas und die großzügige Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit recht herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Phys. Dr. H. Pfister, unter dessen Führung und Anleitung diese Arbeit entstanden ist. Herr Dr. Pfister hat durch seine sachverständigen Anregungen und seinen stets hilfsbereiten Rat wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Lebenslauf

Ich, Reinhard Michael Kleber, wurde am 21. August 1953 in Thiersheim, Kreis Wunsiedel, als erstes von zwei Kindern des selbstständigen Kaufmanns Adolf Kleber und seiner Frau Helene, geb. Storz, geboren.

In den Jahren 1959 bis 1964 besuchte ich die Volksschule in Thiersheim. Anschließend war ich Schüler am mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig des Otto-Hahn-Gymnasiums in Marktredwitz, wo ich auch im Juni 1973 mein Abitur ablegte.

Im Wintersemester 1973/74 begann ich an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg das Studium der Medizin. Die Ärztliche Vorprüfung legte ich am 26. August 1975 ab, den Ersten Abschnitt der Ärztlichen Prüfung am 31. August 1976 und den Zweiten Abschnitt der Ärztlichen Prüfung am 31. August 1978. Am 15. Oktober 1979 bestand ich den schriftlichen Teil des Dritten Abschnitts der Ärztlichen Prüfung und am 22. Oktober 1979 den mündlichen Teil.

Meine Approbationsurkunde als Arzt wurde vom Bayerischen Staatsministerium des Innern in München am 15. November 1979 ausgestellt.

Seit dem 7. Januar 1980 leiste ich bei der Bundeswehr meinen Wehrdienst ab.

Reinhard Kleber

